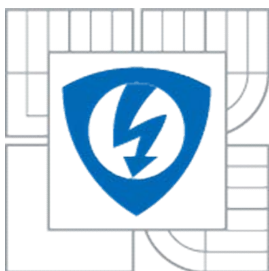




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V SÍTI 110 KV E.ON NAPÁJENÉ Z ROZVODNY OTROKOVICE 110 KV V ROCE 2011

STABILIZED OPERATION AND SHORT - CIRCUIT CONDITIONS WITHIN E.ON 110 KV POWER
NETWORK SUPPLIED FROM OTROKOVICE 110 KV SWITCHING STATION, DURING
THE PERIOD OF 2011

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ JURČA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR BLAŽEK, CSc.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Ondřej Jurča

ID: 98205

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

**Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z rozvodny 110 kV
Otrokovice v roce 2011**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie výpočtu ustáleného chodu sítí vvn a zvn.
2. Teorie výpočtu zkratových poměrů.
3. Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice pro dvě varianty zapojení dvou napájecích transformátorů 400/110 kV v transformovně Otrokovice: samostatné a můstkové.
4. Výpočet zkratových poměrů při jednopólovém a třípólovém zkratu v síti 110 kV pro dvě varianty zapojení transformátorů 400/110 kV.
5. Vyhodnocení výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV pro dvě varianty zapojení transformátorů 400/110 kV.
6. Návrh provozních a technických opatření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace

JURČA, O. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice v roce 2011*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2011, 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Poděkování

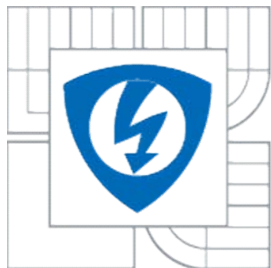
Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladimíru Blažkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a za poskytnutí dalších cenných rad při zpracování této diplomové práce, Ing. Martinu Ramplovi a Ing. Petru Jandovi za pomoc při realizaci výpočtů, mé dobré kamarádce Kateřině Martinátové za jazykovou úpravu práce a všem mým kamarádům za příjemně strávené studentské léta a nezapomenutelné zážitky, jenž jsem s nimi prožil.

Největší poděkování však patří mým rodičům, Josefu a Vladimíře Jurčovým, za všechno.

Ondřej Jurča



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

**Ustálený chod a zkratové poměry
v síti 110 kV E.ON napájené
z rozvodny 110 kV Otrokovice v roce
2011**

Bc. Ondřej Jurča

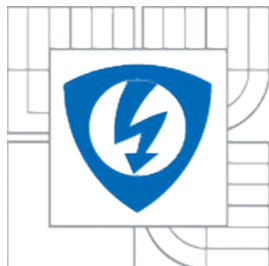
vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

**Stabilized operation and short-circuit
conditions within E.ON 110 kV
power network supplied from
Otrokovice 110 kV switching station,
during the period of 2011**

by

Bc. Ondřej Jurča

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2011

Brno

ABSTRAKT

Distribuční síť 110 kV společnosti E.ON v oblasti napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice je provozována ve dvou variantách zapojení. První varianta je zapojení základní bez můstku. Varianta druhá je pak zapojení s můstkem. Cílem této práce je porovnat na základě výpočtu ustáleného chodu sítě a zkratových poměrů v síti tyto dvě varianty zapojení.

Práce je rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické. Teoretická část sestává z popisu výpočtu ustáleného chodu sítí velmi vysokého napětí a výpočtů zkratových poměrů. Výpočet ustáleného chodu je zde popsán pomocí Gauss-Seidelovy a Newtonovy iterační metody. V případě zkratových poměrů jsou popsány jejich charakteristické veličiny, účinky, průběh a různé způsoby jejich výpočtu. Ve druhé části jsou tyto teoretické poznatky aplikovány na vstupní data, a pomocí dispečerského programu jsou provedeny náležité výpočty chodu sítě a zkratových poměrů. Vypočtené hodnoty jsou v práci vypsány a na jejich základě je pak provedeno vyhodnocení obou možných zapojení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Gauss-Seidlova iterační metoda; Newtonova iterační metoda; poměrné hodnoty; souměrné složky; můstkové zapojení sítě; elektrizační soustava; distribuční síť

ABSTRACT

Distribution network 110 kV owned by E. ON in the area Otrokovice; powered by 110 kV and two variants of involvement contained. The first option is basic involvement, without the use of the bridge. The second option includes involvement with the bridge. The aim of this study is to compare; by calculating the steady-state network operation and short circuit conditions of the network, the involvement of these two options.

The thesis is divided into two parts, theoretical and practical. The theoretical part consists of a description of the steady operation of networks of high-voltage and short circuit ratio calculations. Load flow calculations are described by the Gauss-Seidel and Newton iterative method. In the case of short-circuit conditions, the effects of their characteristic values, processes and various methods of calculation are described. In the second part, this theoretical knowledge is applied to input data and dispatching programme with the appropriate calculations of network operation and short circuit conditions. The calculated values are listed in the thesis, on the basis of which an evaluation of the two possible connections is made.

KEY WORDS

Gauss-Seidel iterative method, Newton iterative method, relative values, symmetrical components, bridge circuit network, electricity system, distribution network

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	3
SEZNAM TABULEK.....	3
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	3
1 ÚVOD	3
2 CÍLE PRÁCE.....	3
3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	3
3.1 KLASIFIKACE UZLŮ A PODMÍNKY URČITOSTI CHODU SÍTĚ	3
3.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA.....	3
3.2.1 ELIMINACE BILANČNÍHO UZLU	3
3.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA	3
3.3.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU GAUSS-SEIDLOVOU METODOU	3
3.3.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODOU	3
4 PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH	3
4.1 ZKRATOVÉ PORUCHY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ	3
4.1.1 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU.....	3
4.1.2 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU	3
4.1.3 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ	3
4.1.4 VÝPOČTY ZKRATOVÝCH PROUDŮ VE SKUTEČNÝCH HODNOTÁCH	3
4.1.5 VÝPOČTY ZKRATOVÝCH PROUDŮ V POMĚRNÝCH HODNOTÁCH.....	3
4.1.6 VÝPOČTY ZKRATOVÝCH PROUDŮ V SOUSTAVĚ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK.....	3
4.1.7 SOUHRNNÝ PŘEHLED VZTAHŮ PRO VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ PŘI RŮZNÝCH DRUZÍCH ZKRATU	3
4.1.8 ÚČINKY ZKRATOVÝCH PROUDŮ.....	3
5 POPIS ROZVODEN 110 KV V OBLASTI NAPÁJENÉ Z ROZVODNY 110 KV OTROKOVICE3	
5.1 POPIS ROZVODEN VVN/VN V OBLASTI OTROKOVICE	3
5.2 ODEBÍRÁNÉ A DODÁVANÉ VÝKONY V JEDNOTLIVÝCH UZLECH SÍTĚ.....	3
6 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI PŘI ZAPOJENÍ BEZ MŮSTKU	3
6.1 ZAPOJENÍ SÍTĚ BEZ MŮSTKU	3
6.2 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ PŘI ZAPOJENÍ BEZ MŮSTKU	3
6.3 ZTRÁTY ČINNÉHO VÝKONU V SÍTI PŘI ZAPOJENÍ BEZ MŮSTKU	3
6.4 ZKRATOVÉ POMĚRY V SÍTI PŘI ZAPOJENÍ BEZ MŮSTKU	3
6.5 VYHODNOCENÍ USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI PŘI ZAPOJENÍ BEZ MŮSTKU.....	3
7 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ.....	3
7.1 MŮSTKOVÉ ZAPOJENÍ.....	3

7.2 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ.....	3
7.3 ZTRÁTY ČINNÉHO VÝKONU V SÍTI PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ	3
7.4 ZKRATOVÉ POMĚRY PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ	3
7.5 VYHODNOCENÍ USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ.....	3
8 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ PŘI MIMOŘÁDNÝCH STAVECH	3
8.1 VÝPADEK PŘÍPOJNICE „C“ V OTROKOVICKÉ ROZVODNĚ	3
8.2 VÝPADEK VEDENÍ V5501, V5502 A V5506	3
8.3 VYHODNOCENÍ USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ PŘI MIMOŘÁDNÝCH STAVECH.....	3
9 SHRNUÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	3
10 NÁVRH MOŽNÝCH OPATŘENÍ.....	3
11 ZÁVĚR	3
11.1 VYHODNOCENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE	3
12 POUŽITÁ LITERATURA A JINÉ ZDROJE INFORMACÍ	3

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1: Zjednodušené schéma elektrizační soustavy.....</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 3.1: Náhradní schéma ES</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 3.2: Fázorový diagram dodávkového uzlu sítě induktivního charakteru.....</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 3.3: Náhrada prvku sítě mezi uzly i a j π-článkem</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 4.1: Druhy zkratu.....</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 4.2: Průběh souměrného zkratového proudu.....</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 4.3: Průběh zkratového proudu s maximálně vyvinutou stejnosměrnou složkou</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 4.4: Trojfázový zemní zkrat.....</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 4.5: Jednofázový zkrat</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 4.6: Dvoufázový zkrat</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 4.7: Dvoufázový zemní zkrat.....</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 5.1: Zjednodušené schéma oblasti Otrokovice s vyznačením dílčích okruhů.....</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 6.1: Schéma oblasti Otrokovice při zapojení bez můstku</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 7.1: Schéma můstkového zapojení</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 7.2: Schéma oblasti Otrokovice při zapojení sítě s můstkem.....</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 8.1: Schéma oblasti Otrokovice při poruše přípojnice „C“ v rozvodně Otrokovice.....</i>	<i>3</i>
<i>Obr. 8.2: Schéma oblasti Otrokovice při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506</i>	<i>3</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Přehled znamének jalových výkonů při různém charakteru proudu a typu uzlu	3
Tab. 4.1: Složkové impedance vyskytující se v náhradním schématu zkratového obvodu jednotlivých druhů zkratů	3
Tab. 5.1: Dispečerské zkratky příslušící jednotlivým rozvodnám	3
Tab. 5.2: Seznam vedení 110 kV v oblasti Otrokovice	3
Tab. 5.3: Odebírané a dodávané výkony v jednotlivých uzlech sítě	3
Tab. 6.1: Zatížení transformátorů 400/121 kV v rozvodně Otrokovice při zapojení bez můstku	3
Tab. 6.2: Napěťové poměry v jednotlivých rozvodnách při zapojení bez můstku	3
Tab. 6.3-1: Poměry na vedení v oblasti Otrokovice při zapojení bez můstku	3
Tab. 6.3-2: Poměry na vedení v oblasti Otrokovice při zapojení bez můstku (pokračování)	3
Tab. 6.4: Celková bilance ztrát činného výkonu v síti při zapojení bez můstku	3
Tab. 6.5: Zkratové poměry v síti při zapojení bez můstku	3
Tab. 7.1: Zatížení transformátorů 400/121 kV v rozvodně Otrokovice při můstkovém zapojení	3
Tab. 7.2: Napěťové poměry v jednotlivých uzlech sítě při můstkovém zapojení	3
Tab. 7.3-1: Poměry na vedení v oblasti Otrokovice při zapojení s můstkem	3
Tab. 7.3-2: Poměry na vedení v oblasti Otrokovice při zapojení s můstkem (pokračování)	3
Tab. 7.4-1: Změny zatížení vedení při můstkovém zapojení	3
Tab. 7.4-2: Změny zatížení vedení při můstkovém zapojení (pokračování)	3
Tab. 7.5: Celková bilance ztrát činného výkonu v síti při můstkovém zapojení	3
Tab. 7.6-1: Zkratové poměry v síti při můstkovém zapojení	3
Tab. 7.6-2: Zkratové poměry v oblasti Otrokovice při můstkovém zapojení (pokračování)	3
Tab. 8.1: Zatížení transformátorů 400/121 kV při výpadku přípojnice „C“ v rozvodně Otrokovice	3
Tab. 8.2-1: Napěťové poměry v uzlech při výpadku přípojnice „C“ v Otrokovicích	3
Tab. 8.2-2: Napěťové poměry v uzlech při výpadku přípojnice „C“ v Otrokovicích (pokračování)	3
Tab. 8.3: Poměry na vedení v případě výpadku přípojnice „C“ v rozvodně Otrokovice	3
Tab. 8.4: Bilance ztrát činného výkonu v případě výpadku přípojnice „C“ v rozvodně Otrokovice	3
Tab. 8.5: Zatížení transformátorů 400/121 kV při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506	3
Tab. 8.6: Napěťové poměry v uzlech sítě při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506	3
Tab. 8.7-1: Poměry na vedení při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506	3
Tab. 8.7-2: Poměry na vedení při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506 (pokračování)	3
Tab. 8.8: Bilance ztrát činného výkonu v případě výpadku vedení V5501, V5502 a V5506	3

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
$^{(1)} I_k''$	počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu	A
$^{(1)} S_k''$	počáteční rázový zkratový výkon při jednofázovém zkratu	VA
$^{(3)} I_k''$	počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu	A
$^{(3)} S_k''$	počáteční rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu	VA
I_0	fázor netočivé složky proudu	A
I_1	fázor sousledné složky proudu	A
I_2	fázor zpětné složky proudu	A
I_a	fázor proudu ve fázi a	A
I_b	fázor proudu ve fázi b	A
I_c	fázor proudu ve fázi c	A
I_{avyp}	stejnoseměrná (aperiodická) složka vypínacího zkratového proudu	A
I_b	souměrný zkratový vypínací proud	A
I_i	fázor proudu v i -tém uzlu sítě	A
I_i^*	fázor komplexně sdruženého proudu v i -tém uzlu sítě	A
I_k	efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu	A
I_k'	tranzitní zkratový proud	A
I_k''	subtranzitní zkratový proud	A
I_{ke}	ekvivalentní oteplovací proud	A
I_{km}	nárazový zkratový proud	A
I_{lim}	maximální dovolené proudové zatížení vedení, transformátorů	A
I_{th}	ekvivalentní oteplovací proud	A
$I_{tr,n}$	jmenovitý proud transformátoru	A
I_v	vztažný proud	A
I_{vyp}	symetrický vypínací zkratový proud	A
$I_{vyp,ns}$	nesymetrický vypínací zkratový proud	A
J	Jacobián	-
K	součinitel nárazového zkratového proudu	-
P	činný výkon	W
P_1	činný výkon na začátku vedení	W
P_2	činný výkon na konci vedení	W
$P_{g,110}$	činný výkon dodávaný do sítě 110 kV ze závodních elektráren	W
P_{odb}	celkový činný výkon odebíraný ze sítě 110 kV v oblasti Otrokovice	W
P_i	činný výkon v i -tém uzlu sítě	W
Q	jalový výkon	VAr
Q	teplo	J
Q_1	jalový výkon na začátku vedení	VAr
Q_2	jalový výkon na konci vedení	VAr

Q_i	jalový výkon v i -tém uzlu sítě	VAr
R	elektrický odpor	Ω
$R_{tr,n}$	elektrický odpor transformátoru	Ω
S	zdánlivý výkon	VA
$S_{g,n}$	jmenovitý výkon generátoru	VA
S_i	komplexní výkon v i -tém uzlu sítě	VA
S_i^*	komplexně sdružená hodnota komplexního výkonu v i -tém uzlu sítě	VA
S_k''	počáteční rázový zkratový výkon	VA
$S_{tr,n}$	jmenovitý výkon transformátoru	VA
S_v	vztažný výkon	VA
U	elektrické napětí	V
U_1	napětí na začátku vedení	V
U_2	napětí na konci vedení	V
U_0	fázor netočivé složky napětí	V
U_1	fázor sousledné složky napětí	V
U_2	fázor zpětné složky napětí	V
U_a	fázor fázového napětí ve fázi a	V
U_b	fázor fázového napětí ve fázi b	V
U_c	fázor fázového napětí ve fázi c	V
U_f	fázor napětí na svorkách alternátoru	V
U_i	fázor napětí v i -tém uzlu sítě	V
$U_{g,n}$	jmenovité napětí generátoru	V
U_i	fázor sdruženého napětí v i -tém uzlu sítě	V
U_i^*	komplexně sdružená hodnota fázoru sdruženého napětí v i -tém uzlu sítě	V
U_{i0}	fázor netočivé složky vnitřního napětí alternátoru	V
U_{i1}	fázor sousledné složky vnitřního napětí alternátoru	V
U_{i2}	fázor zpětné složky vnitřního napětí alternátoru	V
U_m	jmenovité sdružené napětí třífázové soustavy	V
U_n	jmenovité sdružené napětí	V
$U_{s,n}$	jmenovité sdružené napětí sítě	V
$U_{tr,n}$	jmenovité napětí transformátoru	V
U_v	vztažné napětí	V
$U_{ved,n}$	jmenovité napětí vedení	V
$X_{s,p}$	přepočtená hodnota induktivní reaktance sítě	Ω
$X_{tr,p}$	přepočtená hodnota induktivní reaktance transformátoru	Ω
Y_{c0}	netočivá složka celkové admitance	S
Y_{c1}	sousledná složka celkové admitance	S
Y_{c2}	zpětná složka celkové admitance	S
Y_{ii}	diagonální prvek uzlové admitanční matice	S
Y_{ij}	mimo diagonální prvek uzlové admitanční matice	S
Z_{c0}	netočivá složka celkové impedance	Ω

\mathbf{Z}_{c1}	sousledná složka celkové impedance	Ω
\mathbf{Z}_{c2}	zpětná složka celkové impedance	Ω
$\mathbf{Z}_{g,p}$	přepočtená hodnota náhradní impedance generátoru	Ω
\mathbf{Z}_k	zkratová impedance	Ω
Z_k	modul zkratové impedance	Ω
$\mathbf{Z}_{s,n}$	jmenovitá impedance sítě	Ω
$Z_{s,n}$	modul jmenovité impedance sítě	Ω
$\mathbf{Z}_{s,p}$	přepočtená hodnota impedance sítě	Ω
$Z_{s,p}$	modul přepočtené hodnoty impedance sítě	Ω
$\mathbf{Z}_{tr,p}$	přepočtená hodnota impedance transformátoru	Ω
$Z_{tr,p}$	modul přepočtené hodnoty impedance transformátoru	Ω
Z_v	vztažná impedance	Ω
$\mathbf{Z}_{ved,n}$	jmenovitá impedance vedení	Ω
$\mathbf{Z}_{ved,p}$	přepočtená hodnota impedance vedení	Ω
$^{(1)}S_{zk}$	zatížení rozvodny zkratovým výkonem při jednofázovém zkratu	%
$^{(3)}S_{zk}$	zatížení rozvodny zkratovým výkonem při trojfázovém zkratu	%
\mathbf{a}	operátor natočení	-
c	napěťový součinitel	-
e	Eulerovo číslo	-
f	frekvence	Hz
f	označení funkce	-
i	index; označení i -tého uzlu sítě	-
i	poměrná hodnota proudu	p.j.
$i_{d.c.}$	stejnsměrná (aperiodická) složka vypínacího zkratového proudu	A
i_k	okamžitá hodnota zkratového proudu	A
i_{ka}	okamžitá hodnota stejnosměrné (aperiodické) složky zkratového proudu	A
i_{ks}	okamžitá hodnota střídavého zkratového proudu	A
i_p	nárazový zkratový proud	A
i_{zt110}	proudové zatížení distribučních transformátorů 110/23 kV	%
i_{zt400}	proudové zatížení transformátorů 400/121 kV	%
i_{zv}	proudové zatížení vedení	%
j	imaginární jednotka	-
j	index; označení j -tého uzlu sítě	-
k	počet iterací	-
k	počet větví sítě	-
k_1	součinitel pro různé druhy zkratů	-
k_e	koeficient zohledňující různá místa zkratu a různé doby jeho trvání	-
n	počet uzlů sítě	1
p	index; označení uzlu	-
q	index; označení uzlu	-
s	poměrná hodnota výkonu	p.j.
t	čas	s

t_k	doba v okamžiku vypnutí zkratu	s
u	poměrná hodnota napětí	p.j.
u_0	okamžitá hodnota napětí na začátku poruchy	V
u_k	napětí nakrátko transformátoru	%
x	nezávisle proměnná	-
x_d''	poměrná hodnota rázové reaktance generátoru	p.j.
y	závisle proměnná	-
y_{ij}	větvová admitance mezi uzly i a j	S
$z_{g,p}$	poměrná hodnota přepočtené impedance generátoru	p.j.
z_k	poměrná hodnota zkratové impedance	p.j.
$z_{s,p}$	poměrná hodnota modulu přepočtené impedance sítě	p.j.
$z_{tr,p}$	poměrná hodnota přepočtené impedance transformátoru	p.j.
$z_{ved,p}$	poměrná hodnota přepočtené impedance vedení	p.j.
ΔP	ztráty činného výkonu	W
ΔP_{Cu}	ztráty transformátoru nakrátko	W
ΔP_{ij}	ztráty činného výkonu mezi i -tým a j -tým uzlem	W
ΔP_k	ztráty transformátoru nakrátko	W
$\Delta P_{tr,DS}$	ztráty činného výkonu na distribučních transformátorech 110/23 kV	W
ΔQ_{ij}	ztráty jalového výkonu mezi i -tým a j -tým uzlem	VAr
ΔU_i	diference odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty	V
Δx_i	vypočtené hodnoty diferencí	-
Δy_i	rozdíl zadané hodnoty pravé strany rovnice a odhadu hodnoty	-
α	úhel proudu	°
α	úhel fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratové poruchy	°
δ	úhel napětí	°
$\delta^{(1)} I_k''$	změna počátečního rázového zkratového proudu při jednofázovém zkratu	%
$\delta^{(3)} I_k''$	změna počátečního rázového zkratového proudu při trojfázovém zkratu	%
$\delta^{(1)} S_k''$	změna počátečního rázového zkratového výkonu při jednofázovém zkratu	%
$\delta^{(3)} S_k''$	změna počátečního rázového zkratového výkonu při trojfázovém zkratu	%
δI	změna proudového zatížení	%
$\delta \Delta P$	změna ztrát činného výkonu	%
δU	změna napětí	%
$\delta \varphi_u$	změna úhlu napětí	%
ε	požadovaná přesnost	-
τ_s	časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu	s
τ_d'	časová konstanta tranzitní složky zkratového proudu	s
τ_d''	časová konstanta subtranzitní složky zkratového proudu	s
ϕ	funkce zahrnující členy s vyššími mocninami a druhé a vyšší derivace f	-
φ	úhel komplexního výkonu	°

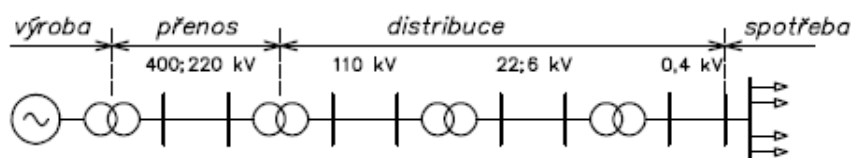
φ_k	úhel impedance zkratového obvodu	°
φ_u	úhel napětí	°
ω	úhlová rychlost	rad.s ⁻¹

Zkratka	Význam
DS	distribuční síť
ES	elektrizační soustava
PS	přenosová soustava
p.j.	poměrná jednotka
vvn	velmi vysoké napětí
vn	vysoké napětí

Pozn.: Všechny komplexní veličiny a matice jsou v celé práci značeny tučnými písmeny.

1 ÚVOD

Elektrizační soustava je soubor vzájemně propojených zařízení, které slouží k výrobě, přenosu, transformaci, distribuci a spotřebě elektrické energie. Zjednodušené schéma elektrizační soustavy je uvedeno na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Zjednodušené schéma elektrizační soustavy

V současné „moderní“ době je nezbytně nutné, aby byla elektrická energie dodávána ke koncovým odběratelům, resp. spotřebitelům neustále, tzn. bez jakýchkoliv přerušení. To bohužel, z praktického hlediska, není zcela možné, jelikož v elektrizační soustavě dochází, jako ve všech možných zařízeních, k nežádoucím jevům, které mohou následně vyvolat poruchy. Ty pak mají za následek výpadky určitých zařízení a v horších případech i přerušeni dodávky elektrické energie, snížení zatížení a tím i snížení výroby, při větších výpadcích odstavení některých elektráren. K tomu, aby se dalo nějakým způsobem těmto poruchám, výpadkům předcházet, je potřeba ES správně regulovat, řídit a v neposlední řadě správně nadimenzovat všechna zařízení v ES. K tomu je potřeba znalost charakteristických hodnot, napětí a proudů, jak při ustáleném chodu sítě, tak i při přechodných jevech, které jsou nežádoucí, ale je potřeba s nimi počítat.

Pro správnou regulaci a řízení ES je potřeba zejména znalost proudů a napětí ve všech uzlech sítě při normálním, ustáleném provozu sítě. Tyto hodnoty pak bývají výchozími pro řešení jevů přechodných. Znalost charakteristických veličin přechodných jevů je základem pro dimenzování všech zařízení ES tak, aby při těchto nepříznivých případech, pokud možno, nedošlo k poškození samotných zařízení nebo ohrožení majetku či zdraví osob vyskytujících se poblíž.

Společnost E.ON Distribuce, a.s. provozuje distribuční síť na napěťových hladinách vvn (110 kV), vn (22 kV) a nn (0,4 kV). Zásobovací území společnosti E.ON je rozděleno na oblast západ (jižní Čechy) a oblast východ (jižní Morava, Vysočina). Distribuční síť 110 kV je napájena převážně z nadřazených transformací PS/110 kV a částečně z výroben E.ON, závodních elektráren a ostatních lokálních zdrojů.

Rozvodna 110 kV Otrokovice leží v oblasti východ a zásobuje elektrickou energií část Zlínského a Jihomoravského kraje. Tato oblast je pak napájena z PS třemi transformátory 400/121 kV a částečně ze závodních elektráren, nacházejících se v této oblasti. Oblast je dále provozována ve dvou oddělených systémech příslušejících jednotlivým transformátorům 400/121 kV. Jeden ze systémů je pak možno provozovat v tzv. můstkovém zapojení.

2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je posoudit výhodnost či nevýhodnost můstkového zapojení, používaného v distribuční síti 110 kV společnosti E.ON v oblasti napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice. Výchozími hodnotami pro posouzení budou vypočtené hodnoty ustáleného chodu sítě a zkratových poměrů v síti pro dva případy zapojení. V prvním případě bude síť zapojena bez můstku, v případě druhém s můstkem. Jako doplňující bude uvedena studie sítě v můstkovém zapojení, při mimořádných provozních stavech.

Všechny výpočty budou stavěny na teoretických podkladech, které budou zpracovány v první části práce. Bude se jednat o teorii výpočtů ustáleného chodu sítí vvn a zvn a zkratových poměrů.

V závěru práce bude uvedeno vyhodnocení dosažených výsledků, pokud bude potřeba, budou navržena opatření na zlepšení dané situace a bude provedeno zhodnocení výhodnosti, příp. nevýhodnosti můstkového zapojení.

3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY

Elektrizační soustavy jsou provozovány v ustáleném stavu. Jedná se o provozní stav, při kterém v zařízeních ES neprobíhají krátkodobé přechodné děje a dochází k rovnováze mezi všemi veličinami charakterizujícími její chod, tj. rovnováha napětí, proudů, činných a jalových výkonů a mechanických momentů v rotačních zdrojích a spotřebičích. Díky neustálým změnám počtu a zatížení spotřebitelů (podle jejich diagramu zatížení) a zdrojů, však ustálený stav v ES neexistuje. Následkem těchto změn dochází, měřeno v čase, k neustálým změnám efektivních hodnot napětí a proudu. Tyto změny však neuvažujeme, jelikož z časového hlediska to jsou změny značně pomalé.

Výpočet ustáleného chodu ES, tedy znalost činných a jalových výkonů, ztrát a napětíových poměrů v jednotlivých prvcích (větvích) a uzlech ES, je důležitá pro řízení provozu i při navrhování dalšího rozvoje ES. Tyto hodnoty jsou také používány jako výchozí pro výpočet přechodných dějů (zkrat, statická a dynamická stabilita) a řady optimalizačních úloh jako je hospodárné rozdělování výroby činných a jalových výkonů, optimální regulace napětí, hodnocení spolehlivosti ES apod. Výpočet ustáleného chodu sítě se zpravidla provádí pro jeho mezní stavy, tzn. v době minimálního a maximálního zatížení sítě a doplňuje se kontrolou všech prvků sítě, zdali některý z nich není přetížen. Běžně jsou odběry a dodávky v jednotlivých uzlech ES zadávány pomocí činných a jalových výkonů, což nám brání v popisu chodu sítě pomocí soustavy lineárních rovnic. Z tohoto důvodu jsme tedy nuceni ustálený chod matematicky formulovat jako nelineární úlohu, což vede k soustavě nelineárních rovnic. Tyto soustavy bývají rozsáhlé stejně tak, jako jsou rozsáhlé ES. Řešíme je tedy za použití numerických metod, tzv. iteračními metodami. Toto s sebou však nese určité problémy a to především z hlediska časové náročnosti a mnohdy špatné nebo žádné konvergence iteračních metod. Proto v případech kdy není požadována velká přesnost se úlohy linearizují (výpočty pro dlouhodobé plánování rozvoje ES příp. výpočty spolehlivosti). Proudů odebírané či dodávané v jednotlivých uzlech se potom dopočítávají podělením zadaných hodnot výkonů jmenovitým napětím sítě nebo střední hodnotou očekávaného napětí v uzlech sítě.

Sestavování základních rovnic ustáleného chodu sítě můžeme provést použitím některé metody řešení lineárních obvodů, např. metodu uzlových napětí nebo metodu smyčkových proudů. Pro výpočet vlastních a vzájemných uzlových admitancí (příp. impedancí) a snadné zapsání propojení jednotlivých větví sítě se v praxi nejčastěji používá metody uzlových napětí.

Abychom mohli danou síť řešit jako jednofázovou (sousednou) síť, musíme vycházet z následujícího předpokladu a to, že řešená ES je tvořena:

- souměrnými zdroji
- souměrnými přenosovými prvky
- souměrnými odběry.

3.1 Klasifikace uzlů a podmínky určitosti chodu sítě

Ustálený chod jednoznačně určují čtyři uzlové veličiny:

- absolutní hodnota napětí U
- úhel napětí δ
- činný výkon P
- jalový výkon Q

Uzly sítě rozlišujeme podle toho, které z těchto čtyř veličin (U , δ , P , Q) známe a které je potřeba dopočítat podle výše uvedených rovnic popisujících ustálený chod. Podle požadavků praxe se uzly obvykle dělí do tří tříd:

Třída (U , δ) – bilanční uzel

V tomto uzlu je zadán fázor napětí, resp. absolutní velikost napětí a jeho úhel. Dopočítáváme zde činný a jalový výkon. Tento uzel slouží k hrazení případné nerovnováhy v bilanci uzlových výkonů. Jelikož stále platí, že v každém okamžiku se *dodávka = odběrům*. Zároveň musí hradit ztráty činného a jalového výkonu v síti, které známe až po ukončení výpočtu a určení výsledné výkonné bilance. Do bilančního uzlu by tedy měl být připojen zdroj výkonu.

Třída (P , Q)

Jedná se o uzly, ve kterých je zadaná dodávka či odběr činného a jalového výkonu. Dodávky a odběry výkonů rozlišujeme dle dohody znaménky \pm . V těchto uzlech se potom dopočítávají fáze napětí, tedy absolutní velikost napětí a jeho úhel.

Třída (U , P)

Jsou to uzly, kde známe absolutní hodnotu napětí a činný výkon. Nazýváme je též uzly *regulační* nebo *kompensační*. Počítáme zde velikost jalového výkonu tak, aby byla dodržena zadaná absolutní hodnota napětí, a dále dopočítáváme úhel napětí.

Je třeba pamatovat na to, že chod sítě nemůže být přeuročen ani neurčitý, proto nelze libovolně volit známé a neznámé veličiny U , δ , P , Q , které charakterizují daný uzel. Obvykle je postačující volba následující kombinace výše uvedených tříd uzlů, což je:

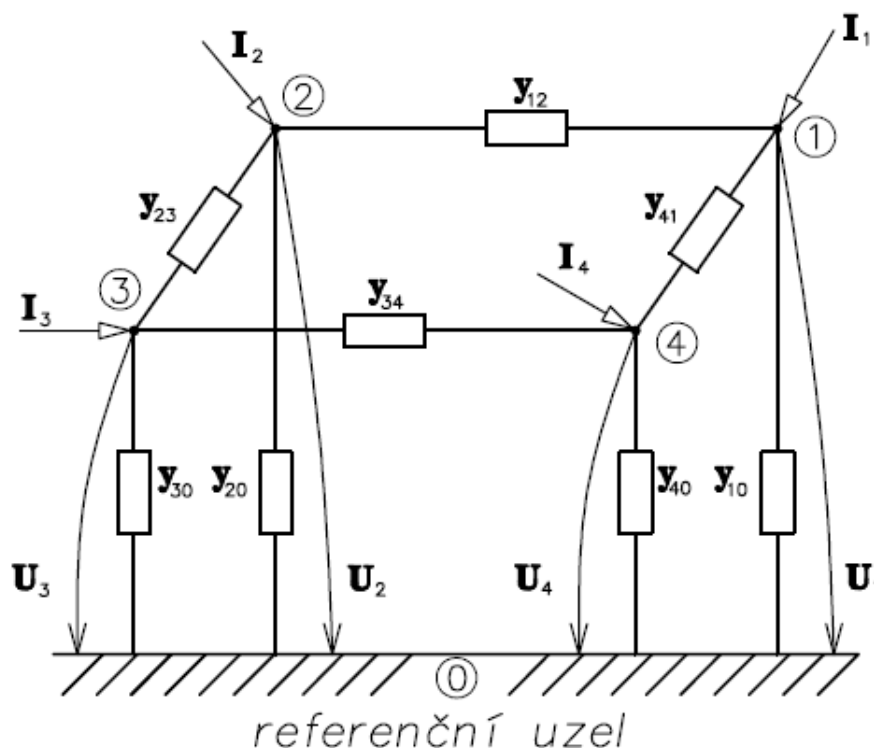
- jeden uzel bilanční (U , δ),
- k uzlů (P , Q),
- $(n-k-1)$ uzlů (U , P),

protože pro řešení máme k dispozici $2(n-1)$ rovnic popisujících ustálený chod.

Na konfiguraci řešené sítě, volbě bilančního uzlu a na počtu a umístění uzlů tříd (P , Q) a (U , P) podstatně závisí rychlost konvergence iteračních metod použitých při výpočtu ustáleného chodu. Nejvhodnější umístění bilančního uzlu, jak ukazují výpočty, je v „elektrickém středu“ sítě, což odpovídá uzlu s největší vlastní admitancí, jinak řečeno, tento uzel má největší diagonální prvek v admitanční uzlové matici. Jelikož mnohdy není v takovém uzlu k dispozici žádný „volný“ zdroj, resp. generátor, který by hradil ztráty a dorovnával případnou nerovnováhu výkonů v síti, je možno volit jako bilanční i jiný uzel v síti. Potom je však nutné rozšířit uvedenou základní klasifikaci uzlů a blíže specifikovat podmínky určitosti chodu sítě. Další možností je rozdělit ztrát určitým dílem mezi všechny generátory v síti. Toto však do jisté míry komplikuje matematické řešení úlohy a proto se vesměs uvažuje, že síť obsahuje pouze uzly základních tříd (U , δ), (P , Q), (U , P).

3.2 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Řešíme-li ustálený chod jako lineární úlohu, vycházíme z předpokladu, že hodnoty dodávaných a odebíraných proudů v jednotlivých uzlech sítě jsou známy, resp. jsou zadány. Dále pak, všechny prvky sítě jsou zadány jejich podélnými a příčnými admitancemi. Jednotlivé druhy prvků se nahrazují dvojbrany; přenosová a distribuční vedení π -články, transformátory Γ příp. π -články. Daný uzel sítě a uzel s nulovým potenciálem „zem“ jsou vždy propojeny příčnou admitancí, a pokud všechny prvky sítě jsou přepočítány na jedno společné napětí lze ES nahradit schématem na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Náhradní schéma ES

Náhradní schéma sítě na obr. 3.1 lze pomocí metody uzlových napětí matematicky popsat následující soustavou rovnic

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} & \mathbf{Y}_{13} & \mathbf{Y}_{14} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} & \mathbf{Y}_{23} & \mathbf{Y}_{24} \\ \mathbf{Y}_{31} & \mathbf{Y}_{32} & \mathbf{Y}_{33} & \mathbf{Y}_{34} \\ \mathbf{Y}_{41} & \mathbf{Y}_{42} & \mathbf{Y}_{43} & \mathbf{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

kde $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \mathbf{U}_3, \mathbf{U}_4$ jsou neznámá uzlová napětí

$\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_3, \mathbf{I}_4$ jsou zadané uzlové proudy, kde znaménkem „+“ jsou zadány dodávky a znaménkem „-“ odběry.

Soustavu (3.1) můžeme ve zkráceném maticovém tvaru zapsat

$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{Y}] \cdot [\mathbf{U}]. \quad (3.2)$$

Prvky admitanční uzlové matice $[\mathbf{Y}]$ jsou sestaveny podle následujícího postupu, jenž plyne z druhého Kirchhoffova zákona

- i – tý diagonální prvek je tvořen součtem všech admitancí větví, které jsou do tohoto uzlu zapojeny,
- mimo diagonální prvek \mathbf{Y}_{ij} ($i \neq j$) je tvořen záporně vzatým součtem admitancí všech větví spojujících i -tý uzel s j -tým uzlem.

Předpokladem pro tento postup je, že větve nemají žádné vzájemné induktivní vazby. Potom tedy např. pro první diagonální a mimo diagonální prvek bude platit:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{11} &= \mathbf{y}_{12} + \mathbf{y}_{41} + \mathbf{y}_{10} \\ \mathbf{Y}_{12} &= \mathbf{Y}_{21} = -\mathbf{y}_{12} \end{aligned}$$

Pozn.: Pro lepší přehlednost a rozlišení jsou prvky uzlové admitanční matice a uzlové veličiny značeny velkými písmeny a admitance jednotlivých větví a větvové proudy malými písmeny.

Soustavu (3.2) lze také zapsat ve tvaru

$$\mathbf{I}_i = \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j, \quad \text{pro } i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3.3)$$

kde n je počet uzlů v síti mimo uzel referenční, jemuž pro zjednodušení dalších zápisů přiřadíme pevné číslo „0“.

Pozn.: Jestliže nebudeme uvažovat v síti na obr. 3.1 příčné admitance, potom matice $[\mathbf{Y}]$ je singulární a soustava rovnic (3.2) nebo (3.3) je závislá. Závislost odstraníme eliminací bilančního uzlu, viz následující kapitola.

3.2.1 Eliminace bilančního uzlu

Admitanční matice $[\mathbf{Y}]$ je regulární maticí, což znamená, že soustava rovnic (3.1), sestavená pro síť na obr. 3.1, je nezávislá. Jelikož však potřebujeme hradit neznámé proudy tekoucí v příčných větvích a vyrovnávat bilanci mezi dodávkami a odběry, musíme pro tento účel vyhradit jeden z n uzlů dané sítě. Tento uzel nazveme *bilanční uzel* a zavedeme pro něj pevné označení číslem „1“. V tomto uzlu je pro nás neznámý proud a je potřeba zde zadat známé napětí. Je to z důvodu korekce počtu neznámých vůči počtu rovnic v rovnicích (3.1) a (3.3).

Díky znalosti napětí \mathbf{U}_1 v bilančním uzlu lze rovnice (3.1) a (3.3) přepsat do tvarů

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{21} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{Y}_{31} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{Y}_{41} \mathbf{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{22} & \mathbf{Y}_{23} & \mathbf{Y}_{24} \\ \mathbf{Y}_{32} & \mathbf{Y}_{33} & \mathbf{Y}_{34} \\ \mathbf{Y}_{42} & \mathbf{Y}_{43} & \mathbf{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix} \quad \text{a} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{Y}_{i1} \mathbf{U}_1 + \sum_{j=2}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j = \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j, \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (3.5)$$

Výpočet neznámých napětí $\mathbf{U}_2, \mathbf{U}_3, \dots, \mathbf{U}_n$ se provádí např. eliminační metodou, iteračními metodami nebo přímou inverzí admitanční uzlové matice řádu $(n - 1)$. Po vypočtení napětí v uzlech se dopočítávají proudy v jednotlivých větvích sítě a z těchto proudů se dopočítává neznámý proud \mathbf{I}_1 v bilančním uzlu. Eliminací bilančního uzlu nazýváme krok, kdy v rovnicích (3.4) a (3.5) vypustíme rovnici pro bilanční uzel.

Rozložení proudů v síti, resp. ve větvích náhradního schématu stanovíme podle rovnice

$$\mathbf{i}_{pq} = \mathbf{y}_{pq} (\mathbf{U}_p - \mathbf{U}_q). \quad (3.6)$$

Potom proud \mathbf{i}_{pq} je proud tekoucí admitancí \mathbf{y}_{pq} , která je mezi uzly p a q .

Pozn.: Výkon, resp. proud v bilančním uzlu musíme volit s ohledem na reálnost vypočtených hodnot napětí. Lze tedy volit libovolný výkon, resp. proud, ale vypočtená uzlová napětí potom nemusí dávat praktický smysl.

3.3 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

Vzhledem k tomu, že v praxi bývají známy odebírané, či dodávané činné a jalové výkony v uzlech sítě a proudy nelze z těchto hodnot dopočítat, jelikož neznáme napětí v uzlech, vede výpočet ustáleného chodu takto zadané sítě k řešení jako nelineární úlohu. Pro i -tý uzel sítě tedy můžeme psát rovnici

$$\mathbf{S}_i = P_i + jQ_i = \mathbf{U}_i \mathbf{I}_i^*, \quad (3.7)$$

kde \mathbf{I}_i^* je komplexně sdružený proud k proudu \mathbf{I}_i . Vysvětlení znaménka u činného a jalového výkonu v rovnici (3.7) bude provedeno pomocí fázorového diagramu na obr. 3.2. Diagram znázorňuje uzel, ve kterém je umístěna výroba činného a jalového výkonu (proudu) induktivního charakteru. Komplexní výkon dodávaný do uzlu můžeme matematicky zapsat takto.

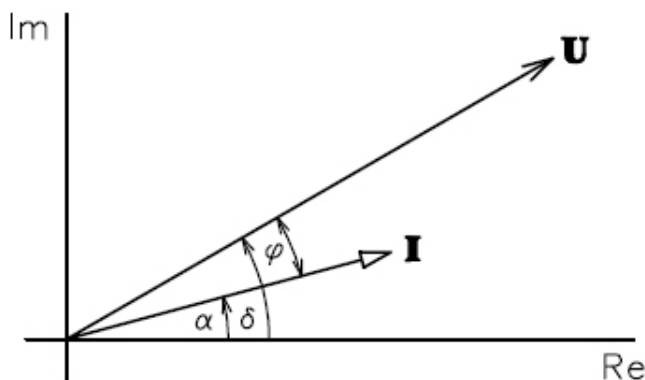
$$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{U} \mathbf{I}^* = \mathbf{U} \angle \delta \cdot \mathbf{I} \angle \alpha = \mathbf{U} \mathbf{I} \angle \varphi = S (\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (3.8)$$

kde $\varphi = \delta - \alpha$ je fázový posun napětí vůči proudu. Platí tedy, že pokud je proud induktivního charakteru (je zpožděn za napětím), potom $\varphi > 0$ a $P > 0$ i $Q > 0$.

Problém může nastat, když u odběrového uzlu bereme proud záporně vzatý, což má vliv i na znaménko u činného a jalového výkonu. Lepší přehled poskytuje tab. 3.1.

Tab. 3.1: Přehled znamének jalových výkonů při různém charakteru proudu a typu uzlu

Uzel		Zdroj	Odběr
Posun proudu		$P > 0$	$P < 0$
induktivní	$\varphi > 0$	$Q > 0$	$Q < 0$
kapacitní	$\varphi < 0$	$Q < 0$	$Q > 0$



Obr. 3.2: Fázorový diagram dodávkového uzlu sítě induktivního charakteru

Vyjádřením proudu \mathbf{I}_i ze vztahu (3.7) dostaneme

$$\mathbf{I}_i = \frac{\mathbf{S}_i^*}{\mathbf{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\mathbf{U}_i^*} \quad (3.9)$$

a následným dosazením do rovnice (3.5) získáme rovnici

$$\mathbf{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\mathbf{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j, \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (3.10)$$

Při pohledu na rovnice (3.5) a (3.10) je zřejmé, že došlo k eliminaci bilančního uzlu a napětí \mathbf{U}_1 je tedy známo. Bilanční uzel v tomto případě hradí rozdíl mezi dodávkami a odběry a navíc ztráty činného a jalového výkonu v síti.

Jelikož jsou v dané síti známy výkony v uzlech sítě (dodávky a odběry), napětí bilančního uzlu a admitance \mathbf{Y}_{ij} , vede výpočet neznámých napětí k řešení soustavy nelineárních (kvadratických) rovnic (3.10). Tento výpočet se zpravidla provádí dvěma numerickými metodami. Jednou z nich je Gauss-Seidlova metoda a druhá je Newtonova metoda. Výsledkem řešení soustavy rovnic (3.10) jsou neznámá uzlová napětí. Jakmile jsou všechny určeny, provede se určení toku výkonů v síti a výkonových ztrát.

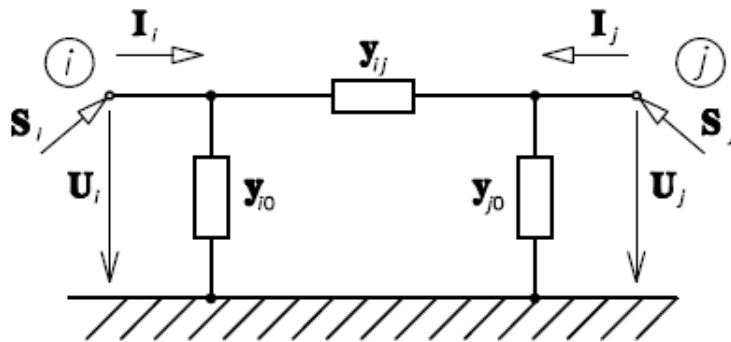
Nahradíme-li všechny prvky sítě π -články, lze pak pro proud tekoucí z uzlu i psát

$$\mathbf{I}_i = (\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_j) \mathbf{y}_{ij} + \mathbf{U}_i \mathbf{y}_{i0} \quad (3.11)$$

a pro výkon

$$\mathbf{S}_i = P_i + jQ_i = \mathbf{U}_i \mathbf{I}_i^*. \quad (3.12)$$

Platí určitá dohoda o směrech toku výkonu do, resp. z uzlu. Platí, že pokud je $P_i > 0$, činný výkon do i -tého uzlu vtéká a naopak. Znaménko u jalového výkonu potom značí, zda se jedná o kapacitní či induktivní výkon.



Obr. 3.3: Náhrada prvku sítě mezi uzly i a j π -článkem

Pro proud a výkon tekoucí do uzlu j analogicky platí

$$\mathbf{I}_j = (\mathbf{U}_j - \mathbf{U}_i) \mathbf{y}_{ij} + \mathbf{U}_j \mathbf{y}_{j0} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{S}_j = P_j + jQ_j = \mathbf{U}_j \mathbf{I}_j^*. \quad (3.14)$$

Sečtením výkonů tekoucích do jednotlivých uzlů i a j v náhradním článku dostáváme činné a jalové ztráty výkonu

$$\Delta P_{ij} = P_i + P_j \quad (3.15)$$

$$\Delta Q_{ij} = Q_i + Q_j . \quad (3.16)$$

Pozn.: Výše uvedené vztahy jsou odvozeny pro jednofázový model sítě, proto v rovnicích počítáme s fázovými hodnotami napětí a výkony přenášených jednou fází.

3.3.1 Výpočet ustáleného chodu Gauss-Seidlovou metodou

Máme danou soustavu lineárních, příp. nelineárních rovnic v následujícím tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (3.17)$$

Soustavu rovnic (4.17) je potřeba vhodnou úpravou převést do tvaru

$$\begin{aligned} x_1 &= y_1 + \phi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_2 &= y_2 + \phi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\vdots \\ x_n &= y_n + \phi_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Iterační postup výpočtu lze zapsat takto

$$\begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= y_1 + \phi_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ x_2^{(k+1)} &= y_2 + \phi_2(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ &\vdots \\ x_n^{(k+1)} &= y_n + \phi_n(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, \dots, x_{n-1}^{(k+1)}, x_n^{(k)}) \end{aligned} \quad (3.19)$$

V rovnici (3.19) označuje horní index 1., 2., ... iteraci. Na začátku výpočtu je potřeba provést odhad kořenů $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$, které použijeme jako hodnoty pro výpočet první iterace.

Výpočet provádíme, dokud není splněna podmínka pro přesnost výpočtu ε

$$\varepsilon \geq |x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}|, \quad \text{pro všechna } i = 1, 2, \dots, n . \quad (3.20)$$

Dále pak předpokládáme, že pro danou soustavu rovnic jsou splněny nutné podmínky konvergence.

Tuto iterační metodu nyní aplikujeme na řešení nelineárních rovnic (3.10). Tuto soustavu však nejprve musíme upravit do tvaru podle (3.18). Při úpravě budeme postupovat následovně. Výraz na pravé straně rovnice (3.10) rozepíšeme na tři části takto

$$\sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j = \sum_{j=1}^{i-1} \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j + \mathbf{Y}_{ii} \mathbf{U}_i + \sum_{j=i+1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j . \quad (3.21)$$

Zpětným dosazením do rovnice (3.10) dostáváme

$$\frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} = \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} U_j + Y_{ii} U_i + \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} U_j. \quad (4.22)$$

Ze vztahu (3.22) si vyjádříme napětí U_i , čímž získáme rovnici

$$U_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} U_j - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} U_j \right). \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.23)$$

Nakonec převedeme rovnici (3.23) do iteračního vztahu podle (3.19) a dostaneme tak

$$U_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(U_i^{(k)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} U_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} U_j^{(k)} \right]. \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.24)$$

Výpočet ukončíme, pokud je splněna podmínka požadované přesnosti ε

$$\varepsilon = |U_i^{(k+1)} - U_i^{(k)}|. \quad (3.25)$$

Posouzení vhodnosti použití Gauss-Seidlový iterační metody shrneme v následujících bodech:

Výhody metody

- jednoduchý algoritmus výpočtu
- relativně krátká doba výpočtu na jeden iterační krok

Nevýhody metody

- relativně pomalá konvergence (zvláště u málo zauzlených sítí)
- potřeba volit vysokou přesnost výpočtu (velmi malé ε); i malá nepřesnost ve vypočtených hodnotách napětí může způsobit značnou chybu v tocích výkonů a uzlových bilancích výkonů.

Uvedené nevýhody se do jisté míry dají eliminovat použitím Newtonovy iterační metody.

3.3.2 Výpočet ustáleného chodu Newtonovou iterační metodou

Mějme zadanou soustavu rovnic (3.17). Tuto soustavu budeme dále řešit Newtonovou iterační metodou. Nejprve provedeme odhad kořenů v počáteční iteraci $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Takto odhadnuté kořeny se od jejich přesných hodnot liší o $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Přesná hodnota kořenů tedy bude $x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n$. Rovnici (3.17) lze tedy přepsat do tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (3.26)$$

Každou rovnici soustavy (3.26) lze rozepsat v Taylorovu řadu funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$. Např. pro první rovnici dostaneme

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \phi_1 = y_1. \quad (3.27)$$

V rovnici (3.27) značí $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0$ hodnotu parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}$ atd. Funkce ϕ_1 pak zahrnuje

členy s vyššími mocninami $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ a druhé a vyšší derivace funkce f_1 .

Přesnější hodnoty odhadů kořenů způsobují, že difference Δx_i jsou malé a všechny členy s vyššími mocninami Δx_i můžeme tedy zanedbat neboť $\phi_1 \rightarrow 0$.

Označme výraz $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) = y_1^{(0)}$, potom můžeme rovnici (3.27) upravit na tvar

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)}. \quad (3.28)$$

$\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty pravé strany y_1 a hodnoty $y_1^{(0)}$ určené dosazením odhadu kořenů do rovnice (3.27).

Stejným postupem lze takto upravit všechny rovnice soustavy (3.26), čímž získáme soustavu lineárních rovnic pro výpočet neznámých diferencí $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Takto získanou soustavu rovnic můžeme přepsat do maticového tvaru takto

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

Ve zkráceném tvaru lze zapsat

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y]. \quad (3.30)$$

Matice parciálních derivací $[J]$ v rovnici (3.29) je tzv. Jacobián. Nové, opravené odhady kořenů určíme ze vztahu (3.31) tak, že z rovnice (3.29), resp. (3.30) dopočteme vektor hledaných diferencí $[\Delta x]$.

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i, \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.31)$$

Tyto nově odhadnuté kořeny použijeme v další iteraci. Je však na místě uvědomit si, že vypočtené hodnoty diferencí Δx_i nejsou zcela přesné z důvodu zanedbání členů s vyššími mocninami a druhých a vyšších derivací v Taylorově rozvoji.

Upravením vztahů (3.30) a (3.31) pak lze tyto rovnice přepsat do iteračního tvaru

$$[\Delta x^{(k)}] = [J^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(k)}] \quad (3.32)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)}. \quad (3.33)$$

Horní index v rovnicích určuje k -tou iteraci.

Předpokladem výpočtu je existence spojitých derivací $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ pro $i, j = 1, 2, \dots, n$, jednoznačnost řešení soustavy rovnic (3.29) a zaručení konvergence iteračního procesu. Tyto podmínky bývají obvykle, v praktických úlohách výpočtu ustáleného chodu sítí, splněny.

Aplikujme tedy tuto iterační metodu na rovnice (3.10), jež popisují ustálený chod sítí. Podle vztahu (3.17) přepíšeme rovnice (3.10) do následujícího tvaru

$$P_i - jQ_i = \mathbf{U}_i^* \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j, \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.34)$$

V rovnici (3.34) rozepíšeme prvky na pravé straně na reálnou a imaginární část. Lze použít složkového nebo polárního tvaru komplexních čísel. V našem případě je vhodné použít tvar polární. Potom

$$\mathbf{U}_i = U_i \angle \delta_i, \quad \mathbf{U}_i^* = U_i \angle -\delta_i, \quad \mathbf{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \alpha_{ij}.$$

Nyní můžeme rovnici (3.34), s uvážením, že $\cos(-x) = \cos x$ a $\sin(-x) = -\sin x$, přepsat do tvaru

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \end{aligned} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.35)$$

Jedná se o soustavu $2(n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů. Vycházíme z předpokladu, že ve všech uzlech sítě jsou zadány dodávané, resp. odebírané činné a jalové výkony vyjma uzlu bilančního, kde je zadáno napětí U_1 a jeho úhel δ_1 . Napětí v bilančním uzlu obvykle pokládáme do reálné osy, proto je jeho úhel roven nule ($\delta_1 = 0$). Iterační výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ provedeme podle schématu (3.29) a s použitím rovnic (3.35) dostáváme soustavu rovnic (3.36). Tu zapíšeme ve zjednodušeném tvaru pomocí matic rozdělením na pole.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \delta \end{bmatrix}. \quad (3.36)$$

Je třeba si povšimnout, že zde ΔU_i neznačí úbytek napětí, jak bývá zvykem, ale diferenci odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty kořenů rovnic (3.35).

Derivováním rovnic (3.35) podle jednotlivých proměnných dostáváme prvky (parciální derivace) Jacobiánu.

Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right]$

diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i Y_{ii} \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.37)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.38)$$

Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right]$

diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.39)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.40)$$

Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right]$

diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2U_i Y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.41)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.42)$$

Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right]$

diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.43)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.44)$$

Celý postup výpočtu lze shrnout v následujících bodech:

- Nejprve provedeme odhad fázorů napětí v jednotlivých uzlech sítě a to v nultém iteračním kroku ($k = 0$). Obvykle se volí všechny fázory napětí rovny napětí v bilančním uzlu ($U_i^{(0)} = U_1, i = 1, 2, \dots, n$).

- Diference výkonů pak stanovíme dosazením odhadnutých fázorů napětí do rovnic (3.35)

$$\Delta P_i^{(0)} = P_{i(zadané)} - P_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)})$$

$$\Delta Q_i^{(0)} = Q_{i(zadané)} - Q_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)})$$

- Pokračujeme dosazením odhadnutých napětí v nultém iteračním kroku do rovnic (3.37) až (3.44) a vyčíslením Jacobiánu rovnice (3.36).
- Diference napětí a jejich úhlů $\Delta U_i^{(0)}, \Delta \delta_i^{(0)}$ v nultém iteračním kroku pak stanovíme vyřešením soustavy lineárních rovnic (3.36).
- Dále určíme opravené hodnoty fázorů napětí na konci prvního iteračního kroku

$$U_i^{(1)} = U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)}$$

$$\delta_i^{(1)} = \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)}$$

pro $i = 1, 2, \dots, n$.

- V iteračním výpočtu potom postupujeme analogicky podle výše uvedených bodů tak, že zpřesněnými hodnotami fázorů napětí vždy nahradíme původní odhady. Výpočet ukončíme obecně k -tou iterací pokud je splněna podmínka

$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

$$|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

pro všechna $i = 1, 2, \dots, n$.

ε tentokrát značí přesnost rozdílu zadaných výkonů a výkonů vypočítaných dosazením vypočtených fázorů napětí do rovnic (3.36).

Zhodnocení Newtonovy iterační metody je následující.

Výhody metody

- velice rychlá konvergence metody
- potřebný počet iterací obvykle závisí málo na velikosti řešené sítě při zadané přesnosti ε

Nevýhody metody

- při výpočtu diferencí kořenů a řešení soustavy rovnic (3.36) dochází ke značnému prodloužení výpočtového času na jednu iteraci

V úlohách, kde nejsou kladeny přílišné nároky na přesnost, lze přijmout určitá zjednodušení. Tyto zjednodušení vycházejí z faktu, že u sítí s převahou podélných reaktancí vedení a transformátorů se činné výkony v uzlech mění nepatrně s malou změnou velikosti napětí. Obdobně je tomu u výkonu jalových, kdy s malou změnou úhlů uzlových napětí se velikost jalových výkonů mění zanedbatelně. Přijmeme-li tyto předpoklady, lze do rovnic (3.36) dosadit, že

$$\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] \doteq 0 \quad ; \quad \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \doteq 0, \quad (3.45)$$

ta pak přejde na tvar, jenž vede ke zrychlení výpočtu

$$[\Delta P] \doteq \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta] \quad ; \quad [\Delta Q] \doteq \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \cdot [\Delta U]. \quad (3.46)$$

4 PŘECHODNÉ JEY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH

Obecně vzato se přechodný děj definuje jako děj, který vzniká při přechodu libovolné soustavy z jednoho ustáleného stavu do nového, druhého ustáleného stavu. Přechodný děj většinou ustává v podobě tlumených oscilací.

Elektroenergetické soustavy, pokud jsou v bezporuchovém stavu, jsou provozovány v ustáleném chodu, jenž byl popsán v předchozí kapitole. V tomto stavu elektrické soustavy dochází pouze k pomalým změnám charakteristických veličin chodu sítě, které jsou způsobené neustálými změnami zatížení. Tyto změny jsou pomalé, a proto se neuvažují.

Přechodné jevy vznikají v důsledku působení tzv. *abnormálních jevů*. Tyto jevy vznikají buďto přímo za provozu v hlavním obvodu v důsledku náhlého porušení izolace (úder blesku do vedení, vlivem stárnutí izolací, cizího zavinění apod.), nebo v ovládací soustavě (chyba v automatickém nebo ručním ovládání vypínacích prvků soustavy atd.). Tyto přechodné jevy jsou v ES nežádoucí, jelikož při jejich působení může docházet ke škodám na majetku, příp. k ohrožení zdraví a života obsluhujícího personálu nebo přítomné veřejnosti. Mimo to mohou nepřímo ohrožovat prostřednictvím přechodných dějů jimi vyvolaných ostatní technické zařízení včetně jejich obsluhy, např. v souběžných slaboproudých vedení, počítačových sítích, plynových, či vodovodních potrubí (bludné proudy) apod.

Klasifikaci přechodných dějů provádíme porovnáváním doby trvání zániku volných složek veličin chodu a jejich periody s periodou průmyslového proudu. Toto rozdělení je důležité pro řešení přechodných jevů a možnosti přijímat při řešení určitá zjednodušení. Přechodné jevy tedy dělíme do následujících skupin:

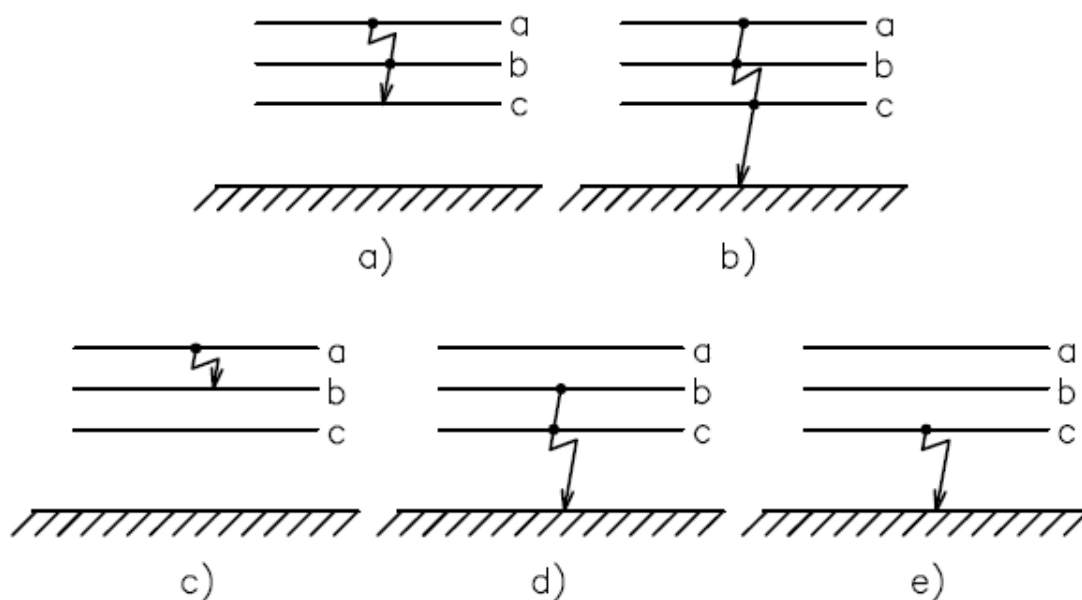
- **pomalé elektromechanické jevy** – perioda volných složek je natolik velká, že se při přechodném ději uplatňují i setrvačné hmoty velkých rotačních strojů obsažených v soustavě. Doba trvání těchto dějů je uváděna v řádech desetin sekund až desítek sekund. Elektrické části soustavy potom nahrazujeme prvky se soustředěnými parametry. Do této skupiny řadíme přechodné děje vyvolané náhlou změnou zatížení zdrojů, při němž vzniká nerovnováha mezi elektrickým a mechanickým momentem na hřídeli generátorů. Tyto přechodné jevy ohrožují synchronní chod. Jejich vznik je spojován se změnami spojení sítě prováděné obsluhou nebo automatikami podle provozních požadavků (velikost zatížení, odstavování pro kontroly a údržbu apod.), porušením izolace (její stárnutí, úder blesku), v neposlední řadě pak s méně častými náhlými velkými změnami výkonů odběrů.
- **středně rychlé elektromagnetické jevy** – perioda volných složek je srovnatelná s periodou průmyslového proudu. Při tomto typu přechodných jevů zanedbáváme setrvačné hmoty rotačních strojů a elektrické části nahrazujeme soustředěnými parametry. Doba trvání je udávána řádově v desetinách sekundy. Nejčastější příčinou těchto jevů je zkratová porucha, což je náhlá změna izolačního odporu mezi krajními vodičem, středním vodičem nebo zemí v přímo uzemněné soustavě.
- **rychlé vlnové jevy** – perioda volných složek je podstatně menší než perioda průmyslového proudu. Opět zde zanedbáváme vliv setrvačných hmot rotačních strojů, elektrické části pak modelujeme pomocí prvků s homogenně rozloženými parametry, jelikož u těchto jevů již nelze zanedbávat rychlost šíření elektromagnetických vln. Doba trvání těchto jevů je uváděna v mikrosekundách až milisekundách. Tyto děje nejčastěji vyvolávají spínací pochody a úder blesku.

Rozdělení přechodných jevů z hlediska doby trvání přechodného děje a délce doby periody zániku volných složek má význam pouze pro způsob řešení přechodných dějů, resp. možnosti zjednodušení matematického vyjádření děje. Jelikož jedna příčina vzniku přechodného děje může způsobit přechodné děje všech tří skupin (např. úder blesku dá vzniknout nebezpečnému přepětí, což vede ke vzniku zkratové poruchy a následného elektromechanického děje), nemá smysl dělit přechodné děje podle příčin přechodného děje.

4.1 Zkratové poruchy v elektrizační soustavě

Zkrat je řazen mezi nejzávažnější poruchy, se kterými musíme v elektrických zařízeních, především pak v silnoprůdových, počítat. Zkrat lze definovat jako chybné vodivé spojení mezi jednotlivými fázemi elektrizační soustavy, příp. mezi některou fází a středním vodičem či zemí v účinně uzemněné soustavě. Dojde-li v ES k takovému spojení, dochází pak k nadměrnému růstu proudu nad běžnou provozní hodnotu tím, že jsou z obvodu vyřazeny všechny prvky představující hlavní část odporu obvodu. Tento proud pak svými tepelnými a dynamickými (silovými) účinky ohrožuje zařízení v ES. Podle přechodového odporu neboli odporu v místě chybného spojení dělíme zkraty na *zkraty dokonalé* (kovové), při nichž přechodový odpor je zanedbatelně malý, a *zkraty nedokonalé*, kdy v místě poruchy dochází k hoření oblouku nebo je styk vodičů jinak nedokonalý. Nedokonalé zkraty ohrožují okolí místa vzniku požárem, naopak zkraty dokonalé způsobují největší tepelné a silové namáhání prvků elektrizační soustavy, a jelikož je nelze vyloučit, jsou rozhodující pro jejich dimenzování.

Dále zkraty můžeme dělit podle toho, jakým způsobem zatěžují, při svém vzniku, třífázové zdroje. Lze je rozdělit do dvou hlavních skupin, kterými jsou zkraty souměrné (třífázový a třífázový zemní zkrat obr. 4.1 a, b) a zkraty nesouměrné (dvoufázový, dvoufázový zemní, jednofázový – obr. 4.1 c, d, e).



Obr. 4.1: Druhy zkratu

K jednofázovým zkratům nejčastěji dochází u venkovních vedení. Trojfázové zkraty zase nejčastěji vznikají u vedení kabelových. U vedení VVN jsou ve většině případů silové a tepelné účinky větší při nesouměrných poruchách než při poruchách souměrných.

Použitím různých druhů vypínacích zařízení nebo automatik určených pro přerušení, vypnutí zkratového proudu do jisté míry ovlivňujeme *dobu trvání zkratové poruchy*. Při použití pojistek nebo jističů s magnetickým zhášením oblouku je doba trvání nejkratší, přibližně 0,1 s je závislá na velikosti zkratového proudu. Při použití ostatních druhů vypínacích zařízení a automatik je doba trvání obvykle 0,2 s až několik sekund. Některé vypínací automatiky mohou mít libovolně dlouhou dobu vypnutí, nezávislou na velikosti proudu, kterou lze nastavit. Použitím těchto zařízení jsme schopni zmenšit počet vypnutých částí elektrizační soustavy při zkratové poruše.

4.1.1 Průběh zkratového proudu

Vznik zkratu způsobí porušení rovnováhy mezi elektrickým a magnetickým polem v prostoru elektrizační soustavy. Každá změna proudu je spojena se změnou magnetického pole, každá změna napětí je spojena se změnou pole elektrického. Do nového ustáleného stavu pak soustava přechází pomocí volných, zanikajících složek proudu a napětí s vlastní periodou příslušných obvodů. Při stanovení časového průběhu napětí a proudu při zkratu obvykle přijímáme následující zjednodušení:

- buzení synchronních zdrojů je stálé,
- u všech prvků elektrizační soustavy zanedbáváme příčné admitance a tyto prvky jsou pak nahrazeny pouze podélnou impedancí induktivního charakteru.

Pak, s přijetím těchto zjednodušujících předpokladů, je okamžitá hodnota zkratového proudu neharmonickou funkcí času se třemi volnými složkami, které zanikají podle exponenciály. Matematicky lze průběh popsat rovnicí

$$i_k(t) = \sqrt{2} \left\{ \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right\} \quad (4.1)$$

$$= i_{ks} + i_{ka}$$

V rovnici (4.1) jsou použity následující veličiny:

α úhel fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratové poruchy ($t = 0$) je mírou okamžité hodnoty napětí na začátku poruchy

$$u_0 = \sqrt{2}U \sin \alpha \quad (4.2)$$

φ_k úhel impedance obvodu zkratového proudu (impedance mezi působištěm vnitřního napětí zdroje a místem poruchy)

I_k'' počáteční efektivní hodnota střídavého, rázového zkratového proudu (subtranzitní proud)

I_k' počáteční efektivní hodnota střídavého přechodného zkratového proudu (tranzitní proud)

I_k efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu

τ_d'', τ_d' časové konstanty volných složek zkratového proudu – rázové a přechodné (subtranzitní a tranzitní)

τ_s časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu

i_{ks} okamžitá hodnota střídavého zkratového proudu (souměrný zkratový proud)

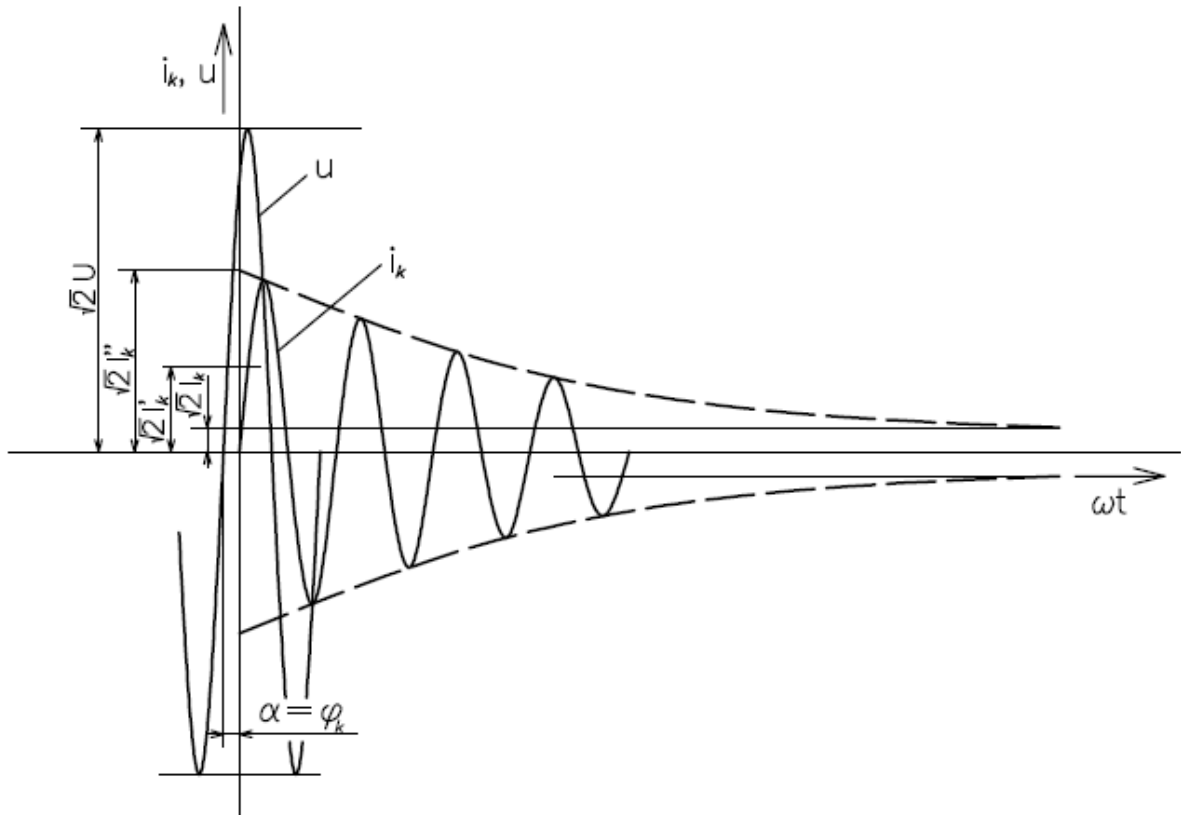
- i_{ka} okamžitá hodnota stejnosměrné (aperiodické) volné složky zkratového proudu
 i_k okamžitá hodnota celkového (nesouměrného) zkratového proudu

Okamžitá hodnota napětí, resp. její úhel α , je rozhodující pro velikost zkreslení střídavého zkratového proudu stejnosměrnou složkou. Vyplývá to z rovnice (4.1). Zpravidla nastávají dva krajní případy. V prvním případě bude zkratový proud souměrný, stejnosměrná složka tedy nevznikne, když bude platit

$$\alpha - \varphi_k = 0, \quad \alpha = \varphi_k. \quad (4.3)$$

Pokud platí rovnice (4.3), úhel natočení fázoru napětí v čase $t = 0$ je stejný jako úhel zkratové impedance φ_k , přejde rovnice (4.1) do tvaru (4.4) a průběh zkratového proudu lze vyjádřit průběhem na obr. 4.2.

$$i_k(t) = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d}} + I_k \right] \sin \omega t. \quad (4.4)$$



Obr. 4.2: Průběh souměrného zkratového proudu

Jestliže dojde ke zkratu při chodu naprázdno, je počáteční hodnota zkratového proudu nulová. Pokud by nedošlo k vypnutí poruchy, zkratový proud by se ustálil na hodnotě harmonického proudu s amplitudou $\sqrt{2}I_k$.

Ve druhém mezním případě je stejnosměrná složka největší. K tomuto případu dochází tehdy, pokud platí

$$\alpha - \varphi_k = -\frac{\pi}{2}, \quad \alpha = \varphi_k - \frac{\pi}{2}. \quad (4.5)$$

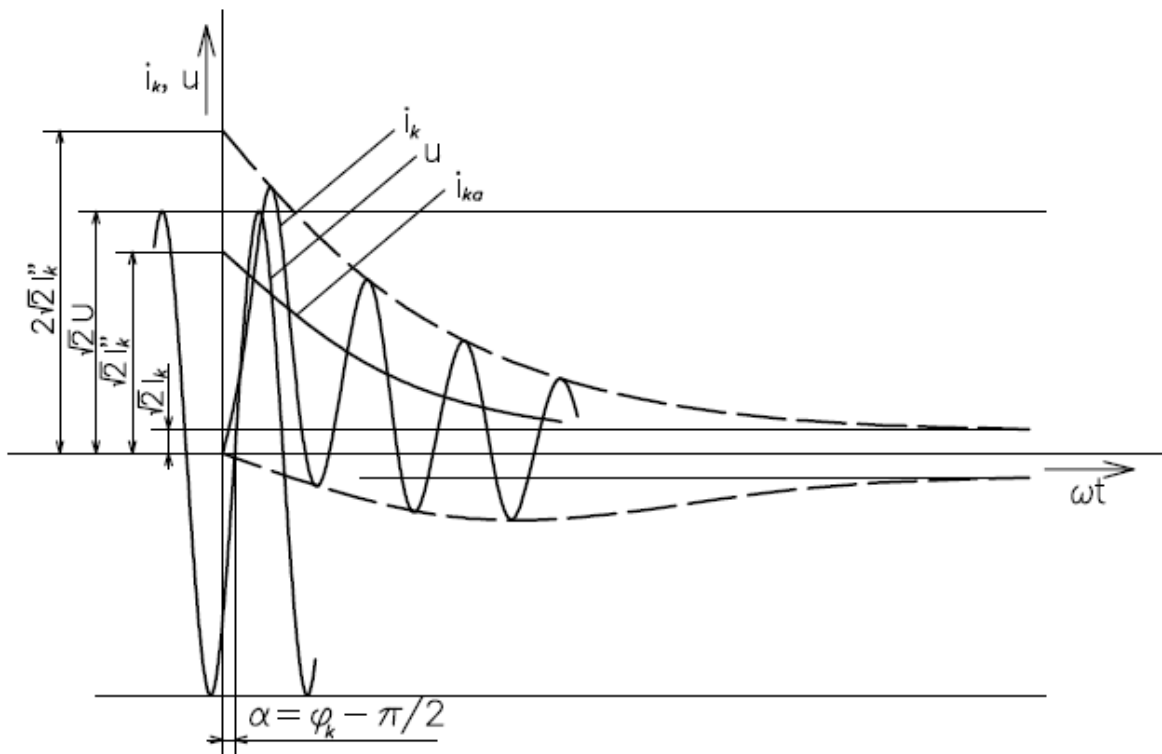
a zároveň vznikne-li zkratová porucha v okamžiku, kdy napětí nabude hodnoty

$$u_0 = \sqrt{2}U \sin\left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.6)$$

Pak je tedy zkratový proud zkreslován stejnosměrnou složkou nejvíce a pro takovýto průběh přechází rovnice (4.1), s uvažáním, že platí $\sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -1$ a $\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -\cos \omega t$, do tvaru

$$i_k(t) = \sqrt{2} \left\{ I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} - \left[(I_k'' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \cos \omega t \right\}. \quad (4.7)$$

Průběh zkratového proudu s největší stejnosměrnou složkou je na obr. 4.3.



Obr. 4.3: Průběh zkratového proudu s maximálně vyvinutou stejnosměrnou složkou

V tomto případě dosahuje první amplituda zkratového proudu až dvojnásobku amplitudy střídavého zkratového proudu. Z hlediska dimenzování elektrických zařízení a prvků elektrické soustavy je potřeba počítat dynamické a tepelné účinky pro tento nejnejpříznivější případ zkratu.

Časové konstanty subtranzitní, tranzitní a stejnosměrné složky zkratového proudu (τ_d'' , τ_d' , τ_s) jsou závislé na parametrech zdrojů zkratového proudu (synchronní stroje v síti) a na odporu a indukčnosti vnějšího obvodu zkratového proudu (část obvodu mimo zdroje). Obecně platí, že tranzitní časová konstanta samotných synchronních strojů nabývá, podle jejich provedení a velikosti, hodnot v rozmezí 0,04 – 1,8 s, přičemž se zvětšující se impedancí zkratového obvodu se zvětšuje.

Časové konstanty τ_d'' a τ_s jsou několikanásobně menší, a proto je jejich závislost na vnější impedanci zkratového obvodu nevýznamná. U zkratové poruchy vzdálené od zdrojů je tedy ubývání zkratového proudu pomalejší a v některých případech zanedbatelné.

Jednotlivé složky celkového zkratového proudu (subtranzitní, tranzitní, stejnosměrný proud) jsou závislé na odpovídajících impedancích synchronních strojů, jejich vnitřním napětí a na impedanci vnějšího zkratového obvodu. Což znamená, že jsou závislé na buzení synchronních strojů a jejich zatížení před zkratem.

4.1.2 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

Pro dimenzování elektrických zařízení z hlediska účinků zkratových proudů je postačující znát určité hodnoty v průběhu zkratového proudu. Jsou to tyto hodnoty:

Počáteční rázový zkratový proud I_k'' – efektivní hodnota souměrné složky zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu. Určuje se podle vztahu

$$I_k'' = k_1 \frac{c \cdot U_v}{\sqrt{3} |Z_k|}, \quad (4.8)$$

kde k_1 je součinitel pro různé druhy zkratů viz příslušná norma

U_v je sdružené vztažné napětí, obvykle se volí napětí v místě zkratu

Z_k je celková výpočtová impedance zkratového obvodu

c je napěťový součinitel, jenž zahrnuje odhad vnitřního napětí zdrojů za jejich subtranzitní reaktanci v okamžiku zkratu, viz příslušná norma

Nárazový zkratový proud $I_{km} [i_p]$ – největší vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastává v prvním maximu v čase $t = 0,01$ s po vzniku zkratu. Jeho přesnou hodnotu určíme z rovnice

$$I_{km} = i_k(0,01) = \sqrt{2} \left[I_k'' e^{-\frac{0,01}{\tau_s}} + (I_k'' - I_k') e^{-\frac{0,01}{\tau_d}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{0,01}{\tau_d}} + I_k \right]. \quad (4.9)$$

Je výchozí hodnotou při kontrole elektrických zařízení na účinky zkratových proudů. Právě v okamžiku první amplitudy nabývá totiž zkratový proud největší hodnoty a silové účinky jsou tak největší.

V praktických výpočtech se spíše než rovnice (4.9) používá k výpočtu vztah

$$I_{km} = K \sqrt{2} I_k'', \quad (4.10)$$

kde K představuje součinitel nárazového zkratového proudu, jenž stanovuje norma.

Symetrický vypínací zkratový proud $I_{vyp} [I_b]$ – efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vypnutí zkratu t_k . V souladu s rovnicí (4.7) je dán rovnicí

$$I_{vyp} = (I_k'' - I_k') e^{-\frac{t_k}{\tau_d}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t_k}{\tau_d}} + I_k. \quad (4.11)$$

Společně se stejnosměrnou složkou vypínacího zkratového proudu se využívá k volbě vypínačů a jističích zařízení. Pro zkraty elektricky vzdálené od synchronního stroje lze podle normy uvažovat, že

$$I_{vyp} = I_k''. \quad (4.12)$$

Stejnoseměrná (aperiodická) složka vypínacího zkratového proudu I_{avyp} [$i_{d.c.}$] – střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu v čase vypnutí zkratu t_k . Určíme ji podle vztahu

$$I_{avyp} = \sqrt{2} I_k'' e^{-\frac{t_k}{\tau_s}}. \quad (4.13)$$

Nesymetrický vypínací zkratový proud $I_{vyp,ns}$ – lze stanovit ze symetrického vypínacího zkratového proudu I_{vyp} a jeho stejnosměrné složky I_{avyp} podle rovnice

$$I_{vyp,ns} = \sqrt{I_{vyp}^2 + I_{avyp}^2}. \quad (4.14)$$

Ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} [I_{th}] – efektivní hodnota fiktivního proudu harmonického průběhu, který za dobu trvání zkratu t_k vyvine při průchodu rezistancí R stejné množství tepla Q jako časově proměnný zkratový proud s největší možnou stejnosměrnou složkou. Matematicky lze definici popsat rovnicí

$$Q = R \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt = R I_{ke}^2 t_k. \quad (4.15)$$

Z rovnice (5.15) pak vyjádříme ekvivalentní oteplovací proud I_{ke}

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt}. \quad (4.16)$$

Hodnota ekvivalentního oteplovacího proudu je důležitá z hlediska kontroly elektrických zařízení na tepelné účinky zkratových proudů. V praktických úlohách se používá pro výpočet spíš vztahu

$$I_{ke} = k_e I_k'', \quad (4.17)$$

kde k_e je koeficient zohledňující různá místa zkratu a různé doby jeho trvání. Je dán normou.

Ustálený zkratový proud I_k – efektivní hodnota souměrného zkratového proudu, jenž protéká obvodem po odeznění všech přechodných dějů.

Pozn.: V hranatých závorkách jsou pro doplnění uvedeny označení charakteristických veličin tak, jak je definuje norma ČSN EN 60909-0.

4.1.3 Zjednodušující předpoklady výpočtu zkratových proudů

Před samotným výpočtem zkratových poměrů je nutno přijmout určité předpoklady výpočtu, které vedou ke zjednodušení řešené úlohy. Je to především z důvodu rozsáhlosti elektrizační soustavy, množství a obtížím při získávání vstupních hodnot výpočtu, numerické náročnosti přesnějších metod a častému použití při provozu, návrhu a kontrole elektrizační soustavy nebo jejích částí. Jde především o tyto zjednodušení:

1. Jako zdroje zkratového proudu považujeme pouze větší synchronní stroje (generátory, motory a rotační kompenzátory o výkonu větším než cca. 0,5 MVA).
2. Uvažujeme vznik zkratu z chodu zdrojů zkratového proudu na prázdko nebo při jejich jmenovitém zatížení. Napětí zdrojů se považují za soufázová, u všech zdrojů v náhradním schématu stejná. Zdroje lze potom připojit do jednoho uzlu náhradního schématu.
3. Zanedbáváme impedance odběrů.

4. Neuvažují se proudy v příčných admitancích prvků elektrizační soustavy. Všechny prvky se ES se nahrazují pouze podélnou impedancí. U generátorů, transformátorů a venkovních vedeních zvn a vvn se uvažuje pouze podélná reaktance.
5. Předpokládá se, že všechny prvky ES mají lineární charakteristiku podélné impedance a parametry prvků jsou během zkratu neměnné.
6. Zdroje zkratového proudu jsou dány subtranzitní reaktancí (reaktancí na začátku poruchy).
7. Charakteristické hodnoty zkratového proudu jsou uvažovány při maximální stejnosměrné složce.
8. Předpokládá se dokonalý zkrat.
9. Soustavu před zkratem považujeme za symetrickou.

Přijmeme-li tyto zjednodušení, dostaneme lineární náhradní schéma popisující daný zkratový obvod. Všechny zdroje zkratového proudu o stejném harmonickém vnitřním napětí v náhradním schématu jsou připojena mezi referenční a jeden z uzlů schématu.

4.1.4 Výpočty zkratových proudů ve skutečných hodnotách

Obecně při výpočtu zkratových poměrů je důležité se držet určitého postupu. Nejprve je potřeba stanovit impedance (činné odpory, reaktance) jednotlivých prvků zkratového obvodu. Dále pomocí těchto hodnot je potřeba sestavit náhradní schémata všech složkových soustav (sousedné, zpětné, netočivé) a následně provést jejich transfiguraci tak, abychom ve výsledku dostali zkratové impedance sousledné, zpětné a netočivé složkové soustavy pro dané místo zkratu. Z těchto hodnot se pak vypočítá celková výpočtová impedance Z_k , pomocí níž určíme počáteční rázový zkratový proud I_k'' z odhadnutého harmonického napětí zdrojů.

Jelikož se ve zkratovém obvodu obvykle vyskytují transformátory, a tedy schéma obsahuje více napěťových hladin, je nutné impedance všech prvků sítě přepočítat na jedno, tzv. vztažné napětí U_v . Hodnota vztažného napětí se ve většině případů volí napětí v místě zkratové poruchy. Podélné impedance všech prvků ve zkratovém obvodu se pak přepočítávají do náhradního zkratového obvodu pomocí druhé mocniny převodu mezi základním obvodem s napětím vztažným U_v a obvodem s napětím jmenovitým U_n , ve kterém se nachází přepočítávaná impedance.

Dále budou uvedeny rovnice vybraných prvků ES pro výpočet jejich podélných impedancí používaných v náhradním schématu zkratového obvodu.

Přepočtená náhradní impedance vedení $Z_{ved,p}$

$$Z_{ved,p} = Z_{ved,n} \left(\frac{U_v}{U_{ved,n}} \right)^2. \quad (4.18)$$

$Z_{ved,n}$ je jmenovitá impedance vedení v napěťové hladině $U_{ved,n}$.

Přepočtená náhradní impedance transformátoru $Z_{tr,p}$

Nejprve je potřeba stanovit modul náhradní impedance transformátoru $Z_{tr,p}$. Ten určíme z napětí nakrátko u_k a jmenovitého výkonu transformátoru $S_{tr,n}$.

$$Z_{tr,p} = u_k \frac{U_{tr,n}^2}{S_{tr,n}} \left(\frac{U_v}{U_{tr,n}} \right)^2 = u_k \frac{U_v^2}{S_{tr,n}}. \quad (4.19)$$

Pro další výpočty je potřeba znát náhradní rezistanci transformátoru $R_{tr,p}$. Tu získáme vyčíslením rovnice

$$R_{tr,p} = \frac{\Delta P_{Cu}}{3 \cdot I_{tr,n}^2} \left(\frac{U_v}{U_{tr,n}} \right)^2 = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_{tr,n}^2}{S_{tr,n}^2} \left(\frac{U_v}{U_{tr,n}} \right)^2 = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_v^2}{S_{tr,n}^2}, \quad (4.20)$$

kde $\Delta P_{Cu} = \Delta P_k$ jsou ztráty transformátoru nakrátko.

Jako další určujeme imaginární část náhradní impedance transformátoru, což je reaktance $X_{tr,p}$. Tu určíme následovně

$$X_{tr,p} = \sqrt{Z_{tr,p}^2 - R_{tr,p}^2}. \quad (4.21)$$

Přepočtená náhradní impedance transformátoru je potom dána součtem přepočtené rezistance a reaktance transformátoru. Platí tedy

$$Z_{tr,p} = R_{tr,p} + jX_{tr,p}. \quad (4.22)$$

Obvykle platí, že $X_{tr,p} \gg R_{tr,p}$, proto se náhradní rezistance u transformátorů zanedbává. Avšak u transformátorů vn/nn se již doporučuje s reaktancí počítat.

Přepočtená náhradní impedance generátoru $Z_{g,p}$

Určuje se z hodnoty subtranzitní reaktance generátoru x_d'' , udávané v poměrných jednotkách, při zanedbání rezistance, a z hodnoty jmenovitého výkonu generátoru $S_{g,n}$.

$$Z_{g,p} \cong jx_d'' \frac{U_{g,n}^2}{S_{g,n}} \left(\frac{U_v}{U_{g,n}} \right)^2 \cong jx_d'' \frac{U_v^2}{S_{g,n}}. \quad (4.23)$$

Modul přepočtené náhradní impedance sítě $Z_{s,p}$

Při výpočtu zkratových poměrů mohou nastat případy, kdy s ohledem na přesnost je potřeba do výpočtu zahrnout vliv připojené sítě obsahující zdroje, avšak její přesnou konfiguraci neznáme. Takovouto síť pak nahrazujeme náhradní impedancí vypočtené z jmenovitého napětí sítě $U_{s,n}$ a počátečního rázového zkratového výkonu sítě při trojfázovém zkratu S_{ks}'' , případně počátečního rázového zkratového proudu příspěvku této sítě I_{ks}'' , což je zkratový proud, který by tekla do trojfázového zkratu v místě připojení této sítě k řešené (známé) části sítě.

V rovnici (4.8) nahradíme zkratovou impedanci Z_k náhradní impedancí neznámé sítě $Z_{s,n}$ a pro počáteční rázový zkratový proud I_{ks}'' potom dostáváme

$$I_{ks}'' = \frac{cU_{s,n}}{\sqrt{3}|Z_{s,n}|}. \quad (4.24)$$

Po upravení rovnice (4.24) dostáváme modul náhradní impedance sítě $Z_{s,n}$.

$$Z_{s,n} = \frac{cU_{s,n}}{\sqrt{3}I_{ks}''} = \frac{cU_{s,n}^2}{S_{ks}''}. \quad (4.25)$$

Přepočtením modulu náhradní impedance sítě $Z_{s,n}$ na vztažnou hodnotu napětí U_v dostáváme přepočtenou hodnotu modulu impedance sítě $Z_{s,p}$.

$$Z_{s,p} = Z_{s,n} \left(\frac{U_v}{U_{s,n}} \right)^2 = \frac{c U_v^2}{\sqrt{3} I_{ks}'' U_{s,n}} = \frac{c U_v^2}{S_{ks}''}. \quad (4.26)$$

Jelikož bližší údaje o síti obvykle nejsou k dispozici, náhradní rezistance $R_{s,p}$ a reaktance $X_{s,p}$ se často vyjadřují z modulu náhradní impedance $Z_{s,p}$ pomocí koeficientů udávaných normou. Ve většině případů je však postačující položit $X_{s,p} \cong Z_{s,p}$. Přepočtená náhradní impedance sítě $Z_{s,p}$ je pak čistě imaginární, což znamená, že síť považujeme za indukční cívku.

4.1.5 Výpočty zkratových proudů v poměrných hodnotách

Výpočty zkratových poměrů je možné také provádět v poměrných hodnotách. Celý náhradní zkratový obvod je potom vázán společným základem poměrných hodnot. Opět se ukazuje jako nejvýhodnější volba vztažného napětí U_v rovna hodnotě napětí v místě zkratu a volba vztažného výkonu S_v , potažmo proudu I_v může být libovolná. Doporučuje se však volit hodnoty, které jsou rovny součtu jmenovitých výkonů, resp. jmenovitých proudů všech zdrojů v řešené síti. Potom dostáváme rovnice pro:

- vztažný proud

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} U_v}, \quad (4.27)$$

- vztažná impedance

$$Z_v = \frac{U_v^2}{S_v}. \quad (4.28)$$

Poměrné hodnoty všech veličin náhradního obvodu lze jednoduše spočítat podělením pojmenovaných hodnot (přepočtených na vztažné napětí) příslušnou vztažnou hodnotou (U_v , S_v , I_v , Z_v). Poměrné hodnoty náhradního zkratového obvodu se potom určují pomocí těchto vztahů:

- pro výkon

$$s = \frac{S}{S_v}, \quad (4.29)$$

- pro napětí

$$u = \frac{U}{U_v}, \quad (4.30)$$

- pro proud

$$i = \frac{I}{I_v}. \quad (4.31)$$

Poměrná hodnota přepočtené náhradní impedance vedení $z_{ved,p}$

$$z_{ved,p} = \frac{Z_{ved,p}}{Z_v} = \frac{Z_{ved,n} \left(\frac{U_v}{U_{ved,n}} \right)^2}{\frac{U_v^2}{S_v}} = Z_{ved,p} \frac{S_v}{U_{ved,n}^2} \quad (4.32)$$

Poměrná hodnota přepočtené náhradní impedance transformátoru $z_{tr,p}$

$$z_{tr,p} = \frac{Z_{tr,p}}{Z_v} = j \frac{u_k \frac{U_v^2}{S_{tr,n}}}{\frac{U_v^2}{S_v}} = j u_k \frac{S_v}{S_{tr,n}} \quad (4.33)$$

Poměrná hodnota přepočtené náhradní impedance generátoru $z_{g,p}$

$$z_{g,p} = j x_d'' \frac{S_v}{S_{g,n}} \quad (4.34)$$

Poměrná hodnota modulu přepočtené náhradní impedance sítě $z_{s,p}$

$$z_{s,p} = \frac{Z_{s,p}}{Z_v} = c \frac{S_v}{S_{ks}''} \quad (4.35)$$

Transfiguraci náhradního zkratového obvodu v poměrných hodnotách provádíme stejně jako při použití pojmenovaných hodnot. Aby bylo možno dosazovat do rovnice (4.8) celkovou impedanci zkratového obvodu v poměrné hodnotě, musíme provést následující úpravy.

$$I_k'' = k_1 \frac{c U_v}{\sqrt{3} Z_k} = k_1 \frac{c U_v}{\sqrt{3} z_k \frac{U_v^2}{S_v}} = k_1 \frac{c S_v}{\sqrt{3} U_v z_k} = k_1 \frac{c I_v}{z_k} \quad (4.36)$$

4.1.6 Výpočty zkratových proudů v soustavě souměrných složek

Za normálního provozu v souměrné síti dochází zejména vlivem připojování různých spotřebičů k narušení symetrie sítě. V poruchových stavech pak dochází k nesymetrii ve většině případů. Jak již bylo výše zmíněno, v sítích vvn a zvn dochází především k nesymetrickým zkratovým poruchám. V těchto případech se rozdělení zkratového proudu neděje rovnoměrně mezi všechny fáze, ale pouze mezi fáze zúčastněné dané zkratové poruchy. Takovéto případy se řeší pomocí metody souměrných složek nebo též metody Fortescueovy. Výchozím pro tuto metodu je fakt, že jakákoli nesouměrná soustava (U_a , U_b , U_c) může být rozložena do tří souměrných vektorů, a to do soustavy *sousledné*, *zpětné* a *netočivé* (U_1 , U_2 , U_0).

Máme danu jednoduchou symetrickou trojfázovou soustavu při chodu naprázdno, ve které je umístěn alternátor jako zdroj sousledné složkové soustavy. V obvodu se dále nachází impedance, jenž je složená z impedance alternátoru a impedance vnější části obvodu.

Pro fázory napětí, v jednotlivých fázích, můžeme psát rovnice

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_a &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_b &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_1 + \mathbf{a} \mathbf{U}_2 . \\ \mathbf{U}_c &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{a} \mathbf{U}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_2 \end{aligned} \quad (4.37)$$

Analogicky dostáváme, pro proudy v jednotlivých fázích, rovnice

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_a &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_b &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 + \mathbf{a} \mathbf{I}_2 , \\ \mathbf{I}_c &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a} \mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_2 \end{aligned} \quad (4.38)$$

kde \mathbf{a} je tzv. operátor natočení, pro který platí

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = 1 \angle \frac{2\pi}{3} \\ \mathbf{a}^2 &= -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} = 1 \angle -\frac{2\pi}{3} . \\ 1 + \mathbf{a}^2 + \mathbf{a} &= 0 \end{aligned} \quad (4.39)$$

V rovnicích (4.37) a (4.38) značí indexy „1“, „2“ a „0“ souslednou, zpětnou a netočivou složkovou soustavu.

Obracený přepočít do souměrných složek lze pro napětí psát rovnice

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_0 &= \frac{\mathbf{U}_a + \mathbf{U}_b + \mathbf{U}_c}{3} \\ \mathbf{U}_1 &= \frac{\mathbf{U}_a + \mathbf{a} \mathbf{U}_b + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_c}{3} . \\ \mathbf{U}_2 &= \frac{\mathbf{U}_a + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_b + \mathbf{a} \mathbf{U}_c}{3} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Analogicky pak pro proudy

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_0 &= \frac{\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c}{3} \\ \mathbf{I}_1 &= \frac{\mathbf{I}_a + \mathbf{a} \mathbf{I}_b + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_c}{3} . \\ \mathbf{I}_2 &= \frac{\mathbf{I}_a + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_b + \mathbf{a} \mathbf{I}_c}{3} \end{aligned} \quad (4.41)$$

Pro souměrné složky vnitřního napětí alternátoru \mathbf{U}_{i0} , \mathbf{U}_{i1} , \mathbf{U}_{i2} platí

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{i0} &= \mathbf{Z}_{c0} \mathbf{I}_0 + \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_{i1} &= \mathbf{Z}_{c1} \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_1 , \\ \mathbf{U}_{i2} &= \mathbf{Z}_{c2} \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2 \end{aligned} \quad (4.42)$$

kde \mathbf{U}_1 , \mathbf{U}_2 , \mathbf{U}_3 jsou souměrné složky napětí v místě zkratu, \mathbf{I}_1 , \mathbf{I}_2 , \mathbf{I}_3 složkové proudy a \mathbf{Z}_{c1} , \mathbf{Z}_{c2} , \mathbf{Z}_{c3} jsou složkové impedance.

Alternátor je vždy zdrojem pouze sousledné složky napětí, proto platí

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{i1} &= \mathbf{U}_i = c\mathbf{U}_f \\ \mathbf{U}_{i2} &= 0 \\ \mathbf{U}_{i0} &= 0 \end{aligned} \quad , \quad (4.43)$$

kde \mathbf{U}_f je fázor napětí na svorkách alternátoru a napěťový součinitel je při chodu naprázdno, podle normy, $c = 0$. Potom můžeme psát základní rovnice složkových soustav

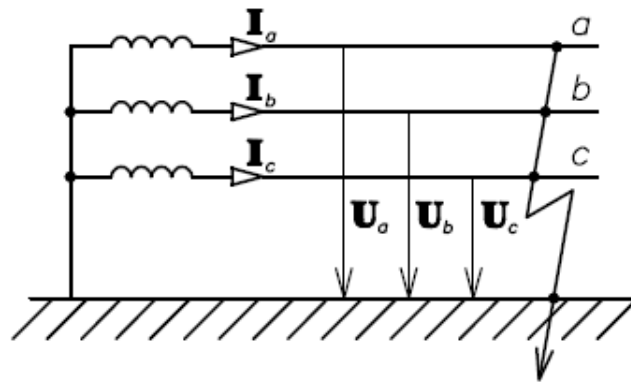
$$\begin{aligned} \mathbf{U}_i &= \mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_{c1}\mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_1 \\ 0 &= \mathbf{Z}_{c2}\mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2 \\ 0 &= \mathbf{Z}_{c0}\mathbf{I}_0 + \mathbf{U}_0 \end{aligned} \quad . \quad (4.44)$$

Z rovnic (4.44) vyplývá, že alternátor je zdrojem sousledné složkové soustavy a že napěťová nesymetrie v místě zkratové poruchy je původcem proudu zpětné a netočivé soustavy. Protože v místě poruchy potřebujeme určit celkem šest veličin (\mathbf{U}_0 , \mathbf{U}_1 , \mathbf{U}_2 , \mathbf{I}_0 , \mathbf{I}_1 , \mathbf{I}_2) je nutné doplnit uvedené základní rovnice (4.44) dalšími třemi rovnicemi podle uvažovaného typu zkratu.

Jelikož se dále v práci bude počítat především trojfázový a jednofázový zkrat, odvození rovnic bude provedeno pouze pro tyto druhy zkratu. U ostatních zkratů budou uvedeny pouze výsledné rovnice pro jejich výpočet.

Trojfázový zemní zkrat

Na obr. 4.4 je znázorněn tento druh zkratu.



Obr. 4.4: Trojfázový zemní zkrat

Podle obr. 4.4 lze pro tento typ zkratu psát následující rovnice.

$$\mathbf{U}_a = \mathbf{U}_b = \mathbf{U}_c = 0 \quad (4.45)$$

Dosazení rovnice (4.45) do rovnice (4.37) dostáváme

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_a &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 = 0 \\ \mathbf{U}_b &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}^2\mathbf{U}_1 + \mathbf{a}\mathbf{U}_2 = 0 \\ \mathbf{U}_c &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}\mathbf{U}_1 + \mathbf{a}^2\mathbf{U}_2 = 0 \end{aligned} \quad (4.46)$$

Po sečtení těchto rovnic zjistíme, že $\mathbf{U}_0 = 0$. S použitím této hodnoty při odečtení druhé rovnice od první dostaneme

$$\mathbf{U}_0 = \mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2 = 0. \quad (4.47)$$

Nyní tyto zjištěné poznatky dosadíme do základních rovnic (4.44) a po patřičných úpravách získáme

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{U}_i}{\mathbf{Z}_{c1}}; \quad \mathbf{I}_2 = 0; \quad \mathbf{I}_0 = 0. \quad (4.48)$$

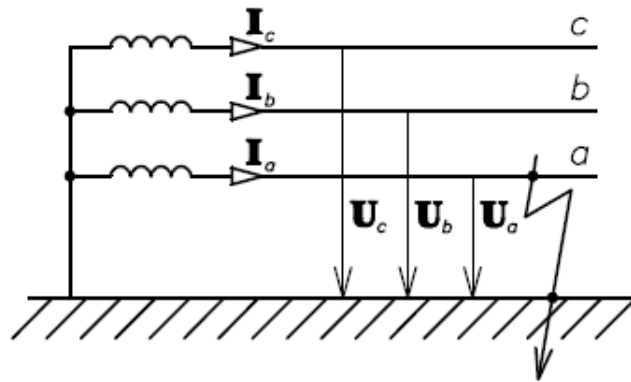
Rovnice (4.48) dosadíme do rovnic (4.38) a s respektováním chodu naprázdno ($c = 1$ a $\mathbf{U}_i = \mathbf{U}_f$) dostaneme požadované zkratové proudy v jednotlivých fázích:

$$\mathbf{I}_a = \frac{\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_{c1}}; \quad \mathbf{I}_b = \mathbf{a}^2 \frac{\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_{c1}}; \quad \mathbf{I}_c = \mathbf{a} \frac{\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_{c1}}. \quad (4.49)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že při trojfázovém zkratu se uplatní pouze složka sousledná.

Jednofázový zkrat

Je uveden na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Jednofázový zkrat

Podle obr. 4.5 můžeme psát

$$\mathbf{U}_a = 0; \quad \mathbf{I}_b = \mathbf{I}_c = 0. \quad (4.50)$$

Dosazením rovnic (4.50) do rovnic (4.37) a (4.38) dostáváme

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_a &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 = 0 \\ \mathbf{I}_b &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 + \mathbf{a} \mathbf{I}_2 = 0. \\ \mathbf{I}_c &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a} \mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_2 = 0 \end{aligned} \quad (4.51)$$

Vzájemným odečtením posledních dvou rovnic v rovnici (4.51) dostáváme

$$(\mathbf{a} - \mathbf{a}^2) \mathbf{I}_1 + (\mathbf{a}^2 - \mathbf{a}) \mathbf{I}_2 = 0. \quad (4.52)$$

Po upravení této rovnice zjišťujeme, že $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$. Dosazením této rovnosti proudů do rovnice (4.38), získáme toto $\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$. Základní rovnice (4.42) pak přejdou na tvar

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_i &= \mathbf{Z}_{c1} \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_1 \\ 0 &= \mathbf{Z}_{c2} \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_2 \\ 0 &= \mathbf{Z}_{c0} \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_0 \end{aligned} \quad (4.53)$$

Sečtením těchto rovnic a s ohledem na rovnici (4.51) dostáváme

$$\mathbf{U}_i = (\mathbf{Z}_{c1} + \mathbf{Z}_{c2} + \mathbf{Z}_{c0}) \mathbf{I}_1, \quad (4.54)$$

odkud potom získáme

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{U}_i}{\mathbf{Z}_{c1} + \mathbf{Z}_{c2} + \mathbf{Z}_{c0}}. \quad (4.55)$$

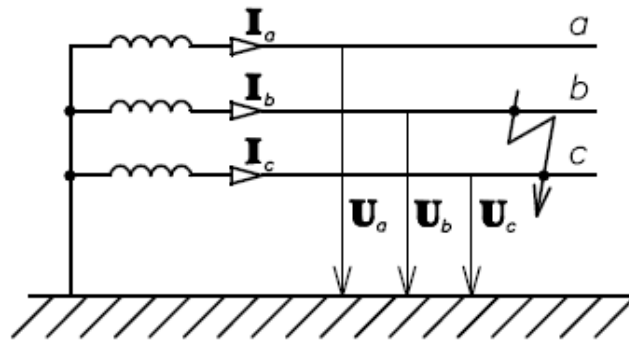
Pak zkratový proud ve fázi a , s uvažováním, že $\mathbf{U}_i = \mathbf{U}_f$, bude

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 = \frac{3\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_{c1} + \mathbf{Z}_{c2} + \mathbf{Z}_{c0}}. \quad (4.56)$$

V případě výpočtu jednofázového zkratu je potřeba určit všechny tři složkové impedance, příp. reaktance pokud zanedbáváme činné odpory jednotlivých prvků sítě.

Dvoufázový zkrat

V případě, že dojde k dvoufázovému zkratu, vzniká nesouměrná soustava proudů, kterou lze rozložit na souslednou a zpětnou souměrnou soustavu. Dvoufázový zkrat je uveden na obr. 4.6.



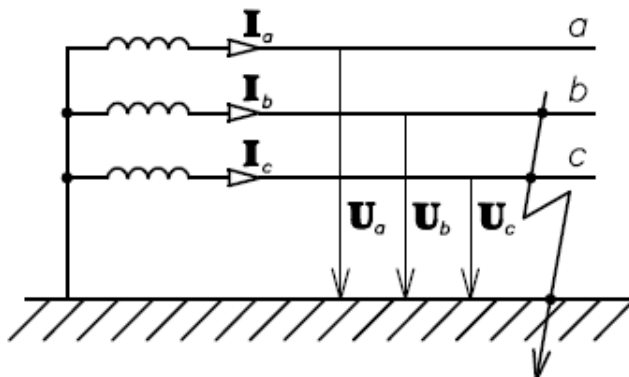
Obr. 4.6: Dvoufázový zkrat

Zkratový proud, v jedné z postižených fází (např. fáze c), jestliže uvažujeme, že $\mathbf{U}_i = \mathbf{U}_f$ potom bude

$$\mathbf{I}_c = \mathbf{a}\mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2\mathbf{I}_2 = (\mathbf{a} - \mathbf{a}^2)\mathbf{I}_1 = j \frac{\sqrt{3}\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_{c1} + \mathbf{Z}_{c2}}. \quad (4.57)$$

Dvoufázový zemní zkrat

Ke dvoufázovému zkratu může dojít pouze u sítí s účinně uzemněnou nulou. Vzniká při něm nesymetrická soustava proudů, jenž můžeme nahradit souměrnou soustavou souslednou, zpětnou a netočivou. Dvoufázový zemní zkrat zobrazuje obr. 4.7.



Obr. 4.7: Dvoufázový zemní zkrat

Hledané zkratové proudy v postižených fázích jsou dány rovnicemi

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_b &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 + \mathbf{a} \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_c &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a} \mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_2 \end{aligned} \quad (4.58)$$

kde jednotlivé složkové proudy jsou dány rovnicemi

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \mathbf{Y}_{c1} (\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_f) = \mathbf{Y}_{c1} \frac{\mathbf{Y}_{c2} + \mathbf{Y}_{c0}}{\mathbf{Y}_{c1} + \mathbf{Y}_{c2} + \mathbf{Y}_{c0}} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{I}_2 &= -\mathbf{Y}_{c2} \mathbf{U}_0 = -\frac{\mathbf{Y}_{c1} \mathbf{Y}_{c2}}{\mathbf{Y}_{c1} + \mathbf{Y}_{c2} + \mathbf{Y}_{c0}} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{I}_0 &= -\mathbf{Y}_{c0} \mathbf{U}_0 = -\frac{\mathbf{Y}_{c0} \mathbf{Y}_{c1}}{\mathbf{Y}_{c1} + \mathbf{Y}_{c2} + \mathbf{Y}_{c0}} \mathbf{U}_i \end{aligned} \quad (4.59)$$

Proud tekoucí zemí je dán součtem proudů fáze b a c

$$(\mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c) = 2\mathbf{I}_0 + (\mathbf{a}^2 + \mathbf{a})\mathbf{I}_1 + (\mathbf{a} + \mathbf{a}^2)\mathbf{I}_2 = 2\mathbf{I}_0 - (\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2) = 3\mathbf{I}_0. \quad (4.60)$$

Napětí nepostižené fáze a lze vypočítat s použitím rovnic (4.37) následovně

$$\mathbf{U}_a = \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 = 3\mathbf{U}_0 = \frac{3\mathbf{Y}_{c1}}{\mathbf{Y}_{c1} + \mathbf{Y}_{c2} + \mathbf{Y}_{c0}} \mathbf{U}_i. \quad (4.61)$$

Pro výpočet jednotlivých typů zkratů je nutné předem vyčíslit jednotlivé složky impedancí, příp. reaktancí. Pro lepší přehled slouží tab. 4.1.

Tab. 4.1: Složkové impedance vyskytující se v náhradním schématu zkratového obvodu jednotlivých druhů zkratů

Zkrat	Souměrné složky impedancí
Trojfázový	<i>sousledná</i>
Dvoufázový	<i>sousledná, zpětná</i>
Jednofázový	<i>sousledná, zpětná, netočivá</i>
Dvoufázový zemní	<i>sousledná, zpětná, netočivá</i>

4.1.7 Souhrnný přehled vztahů pro výpočet zkratových proudů při různých druzích zkratu

Trojfázový zkrat

$$^{(3)} \mathbf{I}_k'' = \frac{\mathbf{U}_i}{\mathbf{Z}_{c1}} \quad (4.62)$$

Jednofázový zkrat

$$^{(1)} \mathbf{I}_k'' = \frac{\mathbf{U}_i}{\mathbf{Z}_{c1} + \mathbf{Z}_{c2} + \mathbf{Z}_{c0}} \quad (4.63)$$

Dvoufázový zkrat

$$^{(2)} \mathbf{I}_k'' = \frac{\mathbf{U}_i}{\mathbf{Z}_{c1} + \mathbf{Z}_{c2}} \quad (4.64)$$

Dvoufázový zemní zkrat

$${}^{(2,N)}\mathbf{I}_k'' = \frac{\mathbf{U}_i}{\mathbf{Z}_{c1} + \frac{\mathbf{Z}_{c2}\mathbf{Z}_{c0}}{\mathbf{Z}_{c2} + \mathbf{Z}_{c0}}} \quad (4.65)$$

4.1.8 Účinky zkratových proudů

Zkratové poruchy v elektrických zařízeních doprovázejí nepříznivé následky, jež jsou způsobeny právě jejich působením. Tyto následky pak ohrožují samotný provoz daného zařízení, jeho bezpečnost a v neposlední řadě pak ohrožují bezpečnost obsluhujícího personálu.

Účinky zkratových proudů se zpravidla dělí na účinky: dynamické, tepelné, elektrický oblouk, přepětí, indukovaná napětí, pokles napětí ve zkratovém obvodu a omezení stability přenosů elektrické energie.

Dynamické účinky – jsou způsobeny elektromagnetickým působením proudů tekoucích ve vodičích uložených vedle sebe. Největší silový náraz je způsoben první amplitudou zkratového proudu, tedy nárazovým zkratovým proudem I_{km} . Pokud elektrická zařízení nejsou správně dimenzována na dynamické účinky zkratových proudů, a tedy na průchod rázového zkratového proudu může docházet k vážným poškozením těchto zařízení. Působením dynamických účinků jsou vodiče namáhány na ohyb, dále působí na podpěrky a průchodky, namáhají vinutí a jejich upevnění, kabelové armatury a všechna zařízení ležící ve zkratovém obvodu. U venkovních vedení, zejména pak vedení vvn, způsobují výkyvy vodičů, čímž dochází ke zkrácení vzdušné vzdálenosti vodičů a následném přeskokům.

Tepelné účinky – jsou stejně ničivé jako dynamické účinky. Dochází k nim díky průchodu velkého zkratového proudu zkratovým obvodem, což vede k nadměrnému zahřívání všech částí tohoto zkratového obvodu se všemi nepříznivými následky. Tyto následky způsobují předčasné stárnutí izolace vodičů, strojů a přístrojů, popraskání podpěrek a průchodek teplem spékání kontaktů spínacích přístrojů, zejména pak odpojovačů. Samotné vodiče pak vlivem nadměrného zahřívání ztrácejí své mechanické vlastnosti.

Elektrický oblouk – je následkem obloukového zkratu. Ten může vzniknout prakticky ve všech případech. V rozvodných zařízeních kde se počítá, především s ohrožením obsluhujícího personálu, vzniká obloukový zkrat zejména díky chybným manipulacím s odpojovači. Není však vyloučen vznik i z jiných důvodů. Nepříznivé účinky elektrického oblouku jsou pak způsobeny především jeho zářením a tlakem, vyvolaným energií oblouku a tepelným a světelným zářením.

Pokles napětí – je způsoben úbytky napětí, jenž vyvolává zkratový proud na impedancích prvků sítě. Pokles napětí při zkratu má pak nepříznivý vliv na spotřebiče, které jsou připojené mezi zdroj proudu a místo zkratu. Tento vliv se liší podle typu spotřebičů.

Indukovaná napětí – vznikají na sousedních vedeních, nejčastěji na slaboproudých, sdělovacích, signálních a jistících. Na těchto zařízeních se pak můžou indukovat velká napětí, především když se zkratový proud vrací zemí zpět (jednofázový, dvoufázový zemní zkrat).

Stabilita chodu – alternátorů, elektráren a celých elektrizačních soustav je při zkratech značně ohrožena, jelikož při nich dochází k náhlé změně zatížení a také dochází k velkému poklesu napětí na svorkách alternátorů. Není-li zkrat včas odpojen, dochází ke kývání rotorů alternátorů, příp. pak dochází k narušení dynamické stability alternátorů, elektráren nebo i celých elektrizačních soustav.

Přepětí – je nebezpečné především při vypínání zkratů. Nebezpečí netkví v jeho velikosti, resp. velikosti zotavného napětí, ale ve strmosti zotavného napětí. Za jistých okolností pak může docházet k porušení vypínacího procesu ve vypínači a k znovu zapálení oblouku, což může vést až ke zničení vypínače.

Mezi přechodné jevy, mimo zkratů, patří i přepětí, statická a dynamická stabilita. Diskutabilní je pak zařazení zemního spojení. Někteří autoři odborné literatury jej zahrnují do přechodných jevů, jiní ho naopak uvádějí samostatně. Těmito přechodnými jevy se dále již nebudeme zabývat, jelikož je to nad obsahový rámec této práce.

5 POPIS ROZVODEN 110 kV V OBLASTI NAPÁJENÉ Z ROZVODNY 110 kV OTROKOVICE

Před samotným výpočtem ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV E.ON v oblasti rozvodny 110 kV Otrokovice je na místě seznámit se s danou oblastí, resp. s účelem a vybavením rozvoden 110 kV/vn napájených právě z rozvodny v Otrokovicích.

Do oblasti otrokovické rozvodny 400/110 kV je zahrnuto celkem dvacet šest rozvoden vvn/vn, které dále slouží k napájení distribuční sítě 22 kV E.ON, velkých průmyslových podniků a rozvoden Českých drah. Na obr. 5.1 je uvedeno zjednodušené schéma oblasti Otrokovické rozvodny.

Celou oblast lze potom rozdělit na dvě velké části. Jednu z nich můžeme nazvat „spodní oblastí“ a druhou pak „horní a střední oblastí“. Každá z těchto dvou pojmenovaných oblastí je pak napájena z jiného přípojnicového systému v otrokovické rozvodně a jiným transformátorem 400/110 kV. Spodní oblast je obvykle napájena z přípojnicového systému „A“ a horní a středová oblast je napájena z přípojnicového systému „B“, případně lze v této oblasti použít tzv. můstkové zapojení a napájet tak oblast současně z přípojnice „B“ a „C“ dvěma transformátory 400/110 kV. Bližší specifikace můstkového zapojení bude uvedena níže.

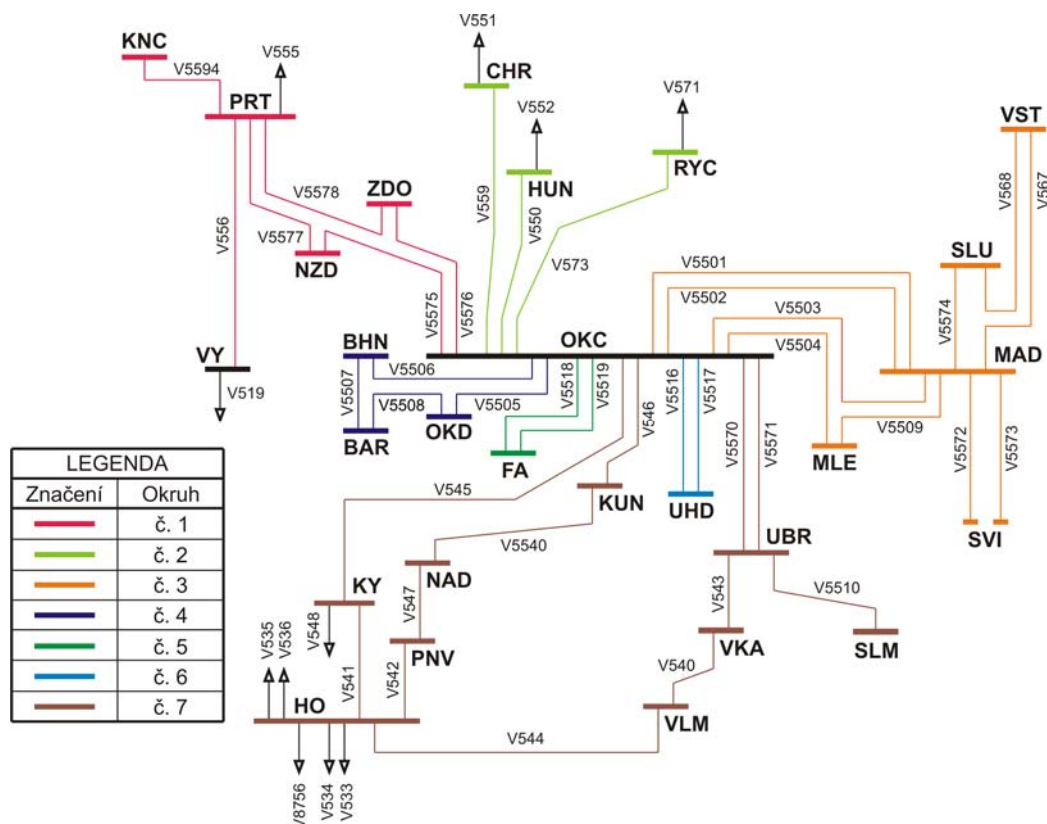
Až na dvě rozvodny, kterými jsou Konice a Slavičín, jsou všechny rozvodny v oblasti propojeny tzv. okružním rozvodem. Konice a Slavičín tvoří paprskový rozvod. Podle okružních rozvodů lze oblast Otrokovice, z důvodu lepšího popisu, rozčlenit na jednotlivé okruhy. Tak jak je to uvedeno na obr. 5.1.

Okruh č. 2 je, v našem případě, rozpojen v rozvodnách Chropyně, Hulín a Rychlov. Jinak se uzavírá přes oblast Prosenice (ČEZ, a.s.) a rozvodny Dluhonice, Prosenice. Okruh č.7, jenž v sobě zahrnuje rozvodny ve spodní části řešené oblasti, je napájen, jak již bylo řečeno, zvláště z přípojnice „A“ v rozvodně Otrokovice. Tento okruh, resp. část oblasti, nelze spojit do můstkového zapojení.

Pozn.: Rozvodny v uváděných schématech a výkresech řešené oblasti, dále pak i v tabulkách s vypočtenými hodnotami, jsou označovány pomocí tzv. dispečerských zkratk. Název rozvoden a jim příslušející dispečerské zkratky jsou vypsány v tab. 5.1.

Tab. 5.1: Dispečerské zkratky příslušící jednotlivým rozvodnám

<i>Rozvodna</i>	<i>Dispečerská zkratka</i>	<i>Rozvodna</i>	<i>Dispečerská zkratka</i>
Otrokovice, Barum	BAR	Otrokovice, ČD	OKD
Otrokovice, Bahňák	BHN	Pánov	PNV
Napajedla, Fatra	FA	Prostějov	PRT
Hodonín	HO	Rychlov	RYC
Hulín	HUN	Slavičín	SLM
Konice	KNC	Slušovice	SLU
Kunovice	KUN	Zlín, Svit	SVI
Kyjov	KY	Uherský Brod	UBR
Mladcová	MAD	Uherské Hradiště	UHD
Malenovice, ZPS	MLE	Velká nad Veličkou	VKA
Nedakonice, ČD	NAD	Veselí na Moravě	VLM
Nezamyslice, ČD	NZD	Vsetín	VST
Otrokovice	OKC	Zdounky	ZDO



Obr. 5.1: Zjednodušené schéma oblasti Otrokovice s vyznačením dílčích okruhů

Pozn.: Barevné značení použité v obr. 5.1 nijak nesouvisí se značením a podrobným zapojením sítě, které je uváděno dále v práci. Schéma na obr. 5.1 a barevné rozdělení do okruhů slouží pro lepší orientaci při popisování sítě.

Rozvodny vvn/vn v oblasti jsou propojeny celkem třicetidevíti vedeními 110 kV. Další vedení, výjma vedení V519, jenž jsou ve schématu na obr. 5.1 znázorněny šipkami, jsou vedení hraniční.

Vedení V551, V552, V555 a V571 propojují oblasti Otrokovice (E.ON) a Prosenice (ČEZ). Vedení V533, V534, V535, V536, V548 a V556 propojují oblasti Sokolnice a Otrokovice (obě E.ON). Vedení V519 a rozvodna Vyškov (VY), již spadají do oblasti Sokolnice. Vedení V8756 je mezistátní vedení ústící do slovenské rozvodny Holič, patřící společnosti Západoslovenská energetika, a.s.. Podrobný seznam výše popsaných vedení je uveden v tab. 5.2. V tabulce jsou uvedeny označení, počáteční a koncové uzly vedení bez ohledu na toky výkonu, jejich přenosové schopnosti a hodnoty maximálního proudového zatížení (I_{lim}).

Všechny hraniční vedení jsou dle potřeby na své jedné straně vypnuty a na straně druhé jsou připojeny na přípojnicí v dané rozvodně. Jsou tedy neustále pod napětím a ve stavu naprázdno. Tímto je také zaručena okamžitá záloha při výpadku primárního vedení, napajejícího daný uzel. Tyto vedení lze považovat za vedení záložní.

Tab. 5.2: Seznam vedení 110 kV v oblasti Otrokovice

Vedení	Počáteční uzel	Koncový uzel	Přenosová schopnost	I_{lim}	Vedení	Počáteční uzel	Koncový uzel	Přenosová schopnost	I_{lim}
			[MW]	[A]				[MW]	[A]
V5501	OKC	MAD	70	450	V5508	BAR	OKD	80	450
V5502	OKC	MAD	70	450	V541	HO	KY	70	450
V5503	OKC	MAD	70	450	V542	HO	PNV	80	450
V5504	OKC	MLE	95	450	V544	HO	VLM	80	450
V5505	OKC	OKD	80	450	V5594	KNC	PRT	40	450
V5506	OKC	BHN	80	450	V5540	KUN	NAD	80	450
V5516	OKC	UHD	70	420	V5509	MAD	MLE	70	450
V5517	OKC	UHD	70	420	V567	MAD	VST	65	450
V5518	OKC	FA	90	450	V547	NAD	PNV	80	450
V5519	OKC	FA	90	450	V5577	NZD	PRT	95	450
V5570	OKC	UBR	80	450	V5578	PRT	ZDO	95	450
V5571	OKC	UBR	80	450	V556	PRT	VY	80	450
V5575	OKC	NZD	95	450	V5510	SLM	UBR	50	350
V5576	OKC	ZDO	95	450	V5574	SLU	MAD	70	450
V545	OKC	KY	80	450	V568	SLU	VST	65	450
V546	OKC	KUN	80	450	V5573	SVI	MAD	25	450
V550	OKC	HUN	70	450	V5572	SVI	MAD	40	450
V559	OKC	CHR	80	450	V543	UBR	VKA	80	450
V573	OKC	RYC	85	450	V540	VKA	VLM	80	450
V5507	BAR	BHN	80	450					

5.1 Popis rozvoden vvn/vn v oblasti Otrokovice

Nyní přejdeme k samotnému, podrobnějšímu popisu jednotlivých rozvoden 110 kV v řešené oblasti otrokovické rozvody 110 kV. Na začátku je potřeba ještě připomenout, že společnost E.ON nemá přesné informace o parametrech transformátorů, které slouží k napájení průmyslových areálů, nebo trakčních vedení Českých drah. U těchto transformátorů jsou nám známy pouze jejich jmenovité výkony. Převody těchto transformátorů a jejich ztráty nemáme k dispozici, proto se s nimi, v dalším textu a tabulkách s vypočtenými hodnotami, již nikde nesetkáme.

Rozvodna Otrokovice – OKC

Jedná se o hlavní rozvodnu v řešené oblasti. Je napájena z přenosové soustavy 400 kV, vedeními V417 ze Sokolnic a V418 z Prosenic (obě ČEPS, a.s.). Rozvodna 110 kV je dále napájena přes tři transformátory 400/121 kV, každý o jmenovitém výkonu 350 MVA. Rozvodna má tři přípojnícové systémy a jeden pomocný. Z přípojnice „A“ je zpravidla napájena spodní část oblasti a z přípojníc „B“ a „C“ je napájena střední a horní část oblasti, přičemž tyto dvě přípojnice jsou většinou využívány pro můstkové zapojení, nicméně to není psaným pravidlem.

Rozvodna Otrokovice, Barum – BAR

Je to podniková rozvodna místního průmyslového areálu Barum. Jsou v ní instalovány dva transformátory oba o jmenovitém výkonu 40 MVA. V průmyslovém areálu se nacházejí dvě turbosoustrojí, každé o výkonu 32 MVA. Pokud tedy v areálu převažuje výroba nad spotřebou, slouží tato rozvodna také k vyvedení výkonu do rozvodné sítě 110 kV.

Rozvodna Otrokovice, Bahňák – BHN

Tato rozvodna slouží výhradně k zásobování distribuční sítě 22 kV. Je vybavena dvěma transformátory 110/23 kV, každý o jmenovitém výkonu 40 MVA.

Rozvodna Napajedla, Fatra – FA

Slouží k zásobování elektrickou energií průmyslového areálu firmy Fatra, a.s. V rozvodně jsou instalovány dva transformátory o jmenovitém výkonu 25 MVA.

Rozvodna Hodonín – HO

Rozvodna je vybavena dvěma přípojnícovými systémy. Jeden je zpravidla využíván pro potřeby oblasti rozvodny Sokolnice a druhý pro oblast rozvodny Otrokovice. Do této rozvodny pracuje elektrárna Hodonín, jejíž instalovaný výkon je 126 MVA. Dále rozvodna slouží pro napájení distribuční sítě 22 kV. Oblast Otrokovice využívá pouze jeden přípojnícový systém a to především k uzavření okruhu č. 7. Obvykle je výkon elektrárny vyveden do oblasti Sokolnice a taktéž napájení DS 22 kV je zajištěno z této oblasti.

Rozvodna Hulín – HUN

Jedna z hraničních rozvoden mezi oblastmi zásobovaných společnostmi E.ON a ČEZ. Je určena pro napájení distribuční sítě 22 kV. K tomu jsou zde umístěny dva transformátory 110/23 kV, každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Rozvodna je stabilně napájena vedením V558, z Otrokovic a záložním vedením V552 ze strany ČEZ z rozvodny Dluhonice.

Rozvodna Chropyně – CHR

Je podniková rozvodna, jenž zásobuje místní průmyslový areál. Je to další z šesti hraničních rozvoden. Primárně je napájena vedením V559 z Otrokovic, jako záložní vedení slouží vedení V551 společnosti ČEZ z rozvodny Dluhonice. V rozvodně jsou instalovány dva transformátory o jmenovitém výkonu 16 MVA.

Rozvodna Konice – KNC

Slouží k napájení distribuční sítě 22 kV. Je napájena pouze vedením V5591 z Protějova. Při jeho výpadku je oblast zásobena elektrickou energií částečně ze sítě 22 kV. V rozvodně jsou instalovány dva transformátory 110/23 kV, oba o jmenovitém výkonu 25 MVA.

Rozvodna Kunovice – KUN

Napájí distribuční síť 22 kV. V rozvodně jsou instalovány dva transformátory 110/23 kV. Transformátor T101 má jmenovitý výkon 40 MVA, transformátor T102 25 MVA.

Rozvodna Kyjov – KY

Do rozvodny je vyveden výkon z místní teplárny, kde jsou instalovány tři turbogenerátory, každý o jmenovitém výkonu 10 MVA. Místní zdroj slouží k poskytování podpůrných služeb typu Dispečerská záloha a jeho režim provozu určuje hlavní dispečink ČEPS, a.s.. Dále rozvodna slouží k napájení distribuční sítě 22 kV. Jsou zde instalovány dva transformátory, oba o jmenovitém výkonu 40 MVA. Tato rozvoda je mimo jiné propojena s oblastí Sokolnice vedením V548 z Klobouků u Brna.

Rozvodna Mladcová – MAD

Rozvodna je vybavena dvěma přípojnícemi. Napájí distribuční síť 22 kV. K tomuto účelu jsou zde instalovány celkem tři transformátory 110/23 kV. Dva z nich, T101 a T102, mají jmenovitý výkon 40 MVA. Třetí transformátor T103 disponuje výkonem 25 MVA. Tato rozvodna hraje významnou roli při můstkovém zapojení, kdy je použita jako rozpadové místo můstku.

Rozvodna Malenovice, ZPS – MLE

Napájí průmyslový areál místní slévárny. Jsou zde instalovány dva transformátory, oba o výkonu 40 MVA.

Rozvodna Nedakonice, ČD – NAD

Jedna ze tří rozvoden Českých drah v této oblasti. Slouží tedy k napájení trakčního vedení ČD. Jsou v ní instalovány celkem čtyři transformátory. Transformátory T1, T2 o jmenovitém výkonu 12,5 MVA a transformátory T101, T102 o jmenovitém výkonu 10 MVA.

Rozvodna Nezamyslice, ČD – NZD

Další drážní rozvodna v oblasti. Jsou zde instalovány dva transformátory. Transformátor T111 o jmenovitém výkonu 12,5 MVA a transformátor T101 o výkonu 10 MVA.

Rozvodna Otrokovice, ČD – OKD

Drážní rozvodna, v níž jsou instalovány dva transformátory, oba o jmenovitém výkonu 10 MVA.

Rozvodna Pánov – PNV

Rozvodna slouží k napájení distribuční sítě 22 kV. Instalovány jsou v ní dva transformátory o jmenovitém výkonu 40 MVA

Rozvodna Prostějov – PRT

Rozvodna je dvousystémová. Jedna přípojnice slouží jako provozní, druhá jako záložní. Slouží k napájení rozvodné sítě 22 kV. Instalovány jsou zde celkem tři transformátory 110/23 kV. Všechny o jmenovitém výkonu 40 MVA. Rozvodna je rovněž spojena hraničním vedením V519 s rozvodnou Vyškov (VY) v oblasti Sokolnice.

Rozvodna Rychlov – RYC

Distribuční rozvodna napájející síť 22 kV. Má instalovány dva transformátory 110/23 kV, každý o jmenovitém výkonu 25 MVA. Je napájena vedením V573 z Otrokovic. V případě jeho výpadku je napájena ze strany ČEZ vedením V571 z Prosenice.

Rozvodna Slavičín – SLM

Rozvodna napájí distribuční síť 22 kV. Jsou zde instalovány dva transformátory o jmenovitém výkonu 40 MVA. Je napájena pouze jedním vedením V5510 z rozvodny v Uherském Brodě (UBR). V případě poruchy je místní oblast napájena částečně ze sítě 22 kV.

Rozvodna Slušovice – SLU

Slouží k napájení sítě 22 kV. Je vybavena dvěma transformátory 110/23 kV, každý o jmenovitém výkonu 40 MVA.

Rozvodna Zlín, Svit – SVI

Je to podniková rozvodna místního průmyslového areálu Svit. Jsou zde dva nezávislé přípojnicové systémy 110 kV, do nichž jsou vyvedeny výkony z místních turbogenerátorů, jejichž celkový instalovaný výkon je 106 MVA. Do jedné z přípojníc, přípojníc „A“, je vyvedena část výkonu přes transformátor 110/6,3 kV T115 o výkonu 40 MVA. Do přípojníc „B“ je vyveden zbytek výkonu a to přes transformátor 110/6,3 kV T114 o výkonu 25 MVA. Ke každé přípojnici je připojeno vedení 110 kV. U přípojníc „A“ je to vedení V5572, u přípojníc „B“ vedení V5573.

Rozvodna Uherský Brod – UBR

Rozvodna, která napájí distribuční síť 22 kV. Obsahuje dva transformátory, oba o výkonu 40 MVA. Je to rozvodna se dvěma přípojniovými systémy, kdy se zpravidla využívá jeden z nich, přičemž druhý slouží jako záložní.

Rozvodna Uherské Hradiště – UHD

Další distribuční rozvodna napájející síť 22 kV. Instalovány jsou zde dva transformátory o jmenovitém výkonu 40 MVA.

Rozvodna Velká nad Veličkou – VKA

Zajišťuje napájení distribuční sítě 22 kV transformátorem T103 o výkonu 25 MVA a také napájení průmyslového areálu společnosti Kordárna, a.s.. Napájení průmyslového areálu je zajištěno přes jejich dva transformátory T101, T102 o výkonu 25 MVA.

Rozvodna Veselí na Moravě – VLM

Slouží jednak pro napájení distribuční sítě 22 kV, a jednak pro napájení průmyslového areálu místních železáren. Napájení distribuční sítě 22 kV je prováděno přes dva transformátory T103 a T104. Transformátor T104 má výkon 40 MVA, transformátor T103 25 MVA. Průmyslový podnik je pak napájen přes transformátory T101 a T102 každý o výkonu 16 MVA.

Rozvodna Vsetín – VST

Rozvodna společnosti ČEZ. Je to rozvodna o dvou přípojniových systémech, z čehož společnost E.ON využívá jeden z nich jako uzel, kde se uzavírá okruh č. 3. V případě neschopnosti napájení uzlu ze strany ČEZ je možno napájet uzel i ze strany E.ON. V opačném případě lze okruh č. 3 napájet ze strany ČEZ.

Rozvodna Zdounky – ZDO

Napájí distribuční síť 22 kV. K tomu jsou zde instalovány dva transformátory, oba o jmenovitém výkonu 25 MVA.

5.2 Odebírané a dodávané výkony v jednotlivých uzlech sítě

Hodnoty odebíraných a dodávaných výkonů v jednotlivých uzlech jsou uvedeny v tab. 5.3. Tyto hodnoty jsou neměnné pro jakékoliv zapojení sítě. V dalších kapitolách již nebudou uváděny. Mimo odebírané (dodávané) výkony jsou v tabulce vypsány ztráty činného výkonu na transformátorech (pouze u transformátorů společnosti E.ON), maximální proudové zatížení (I_{lim}), proud tekoucí na straně vvn (I) a procentuální proudové zatížení transformátoru (i_{zt110}).

Tabulka je dále rozdělena dvojitou čarou tak, aby v její první polovině byly uzly z okruhu č. 1 až č. 6 a v druhé polovině uzly, jenž jsou v okruhu č. 7. Toto rozdělení je učiněno z důvodu přehlednosti a rozdělení oblasti na dvě části tak, jak je popsáno výše. Význam tohoto rozdělení bude lépe zřetelný při prezentaci vypočtených hodnot.

Pro lepší přehlednost byly v tab. 5.3 vynechány hodnoty výkonů dodávaných transformátory 400/121 kV. Ty budou uvedeny vždy zvlášť pro jednotlivé zapojení sítě, jelikož velikost dodávaných výkonů ze 400 kV sítě a jejich využití se vlivem změny zapojení sítě mění, kdežto hodnoty odběrů (dodávek) výkonů a ztrát činného výkonu uvedených v tab. 5.3, jak už bylo uvedeno výše, jsou pro různé zapojení sítě neměnné.

Tab. 5.3: Odebírané a dodávané výkony v jednotlivých uzlech sítě

Roz- vodna	Transfor- mátor	P	Q	ΔP	I_{lim}	I	i_{z110}
		[MW]	[MVar]	[MW]	[A]	[A]	[%]
BAR	T101	-11,8	-4,5	-	210	62,0	29,52
BHN	T101	-10,4	-1,2	-0,050	210	52,1	24,81
	T102	-13,5	-2,1	-0,650	210	67,5	32,14
CHR	T102	-4,1	0,1	-	84	20,0	23,81
FA	T102	-3,4	-0,6	-	131	16,8	12,82
HUN	T102	-31,8	-3,4	-0,113	210	160,7	76,52
KNC	T102	-9,2	-1,9	-0,029	131	48,1	36,72
MAD	T101	-20,3	-1,0	-0,081	131	100,9	77,02
	T102	-21,6	-1,2	-0,099	210	107,2	51,05
MLE	T101	-7,5	-1,1	-	131	37,3	28,47
NZD	T101	-1,2	-0,6	-	52	6,5	12,50
	T111	-0,2	-0,7	-	52	3,7	7,12
OKD	T101	-1,3	0,3	-	52	6,4	12,31
PRT	T101	-23,0	-2,6	-0,090	210	161,1	76,71
	T103	-31,4	-2,4	-0,110	210	118,6	56,48
RYC	T101	-15,6	-1,6	-0,102	131	78,6	60,00
SLU	T101	-24,2	-5,0	-0,120	210	124,6	59,33
SVI	T114	2,0	1,8	-0,037	131	12,6	9,62
	T115	3,0	3,0	-0,028	210	19,8	9,43
UHD	T101	-38,4	-3,2	-0,248	210	194,2	92,48
ZDO	T101	-12,4	-0,8	-0,043	131	62,1	47,40
KUN	T101	-11,6	-2,2	-0,056	210	58,4	27,81
KY	T101	-22,6	-4,2	-0,121	210	121,5	57,86
	T102	-12,8	-2,0	-0,033	210	65,0	30,95
NAD	T102	-0,9	6,8	-	52	33,5	64,42
	T1	0,1	-6,8	-	52	33,2	63,85
PNV	T101	-18,0	-1,0	-0,083	226	90,2	39,91
SLM	T101	-29,4	-6,5	-0,080	210	156,2	74,38
UBR	T101	-22,6	-4,4	-0,113	210	116,5	55,48
	T102	-18,0	-2,4	-0,049	210	90,9	43,29
VKA	T102	-4,8	-0,3	-	131	23,9	18,24
	T103	-7,0	-0,7	-0,035	131	35,4	27,02
VLM	T102	-1,7	-0,1	-	84	8,5	10,12
	T103	-15,0	-0,8	-0,097	131	75,9	57,94

Hodnoty zatížení uvedené v tab. 5.3 odpovídají skutečnému zatížení sítě ze dne 1. března 2011 v 7:00 hodin.

Celkový odebíraný výkon v tomto okamžiku je:

$$P_{odb} = 445,70 \text{ MW},$$

přičemž do sítě 110 kV je, mimo rozvodnu Otrokovice (OKC), ze závodních elektráren dodáván výkon:

$$P_{g, 110} = 5,01 \text{ MW}$$

a ztráty činného výkonu na distribučních transformátorech společnosti E.ON jsou:

$$\Delta P_{tr, DS} = 2,467 \text{ MW}.$$

6 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI PŘI ZAPOJENÍ BEZ MŮSTKU

Veškeré výpočty byly prováděny na Dispečinku 110 kV společnosti E.ON v dispečerském programu Sinaut Spektrum. Jedná se o software, jenž je speciálně navržen pro potřeby dispečinku 110 kV E.ON. Výpočet ustáleného chodu byl programem proveden Newtonovou metodou. Zkratové poměry byly počítány dle základních rovnic pro zkraty, přičemž uvažovaný napěťový součinitel c je $c = 1,1$.

Ustálený chod sítě budeme posuzovat pro různá zapojení z hlediska napěťových poměrů, zatížení transformátorů 400/121 kV, zatížení vedení a ztrát činného výkonu. Budeme sledovat jak se mění velikosti těchto veličin v závislosti na způsobu zapojení sítě. V případě posuzování zkratových poměrů při trojfázovém a jednofázovém zkratu pak budeme sledovat velikosti zkratových výkonů a proudů, zatížení daného uzlu zkratovým výkonem, s ohledem na jmenovitou zkratovou odolnost a změnu zkratových výkonů a proudů při různých zapojeních sítě. Z výsledků porovnání sledovaných hodnot poté provedeme vyhodnocení daných zapojení.

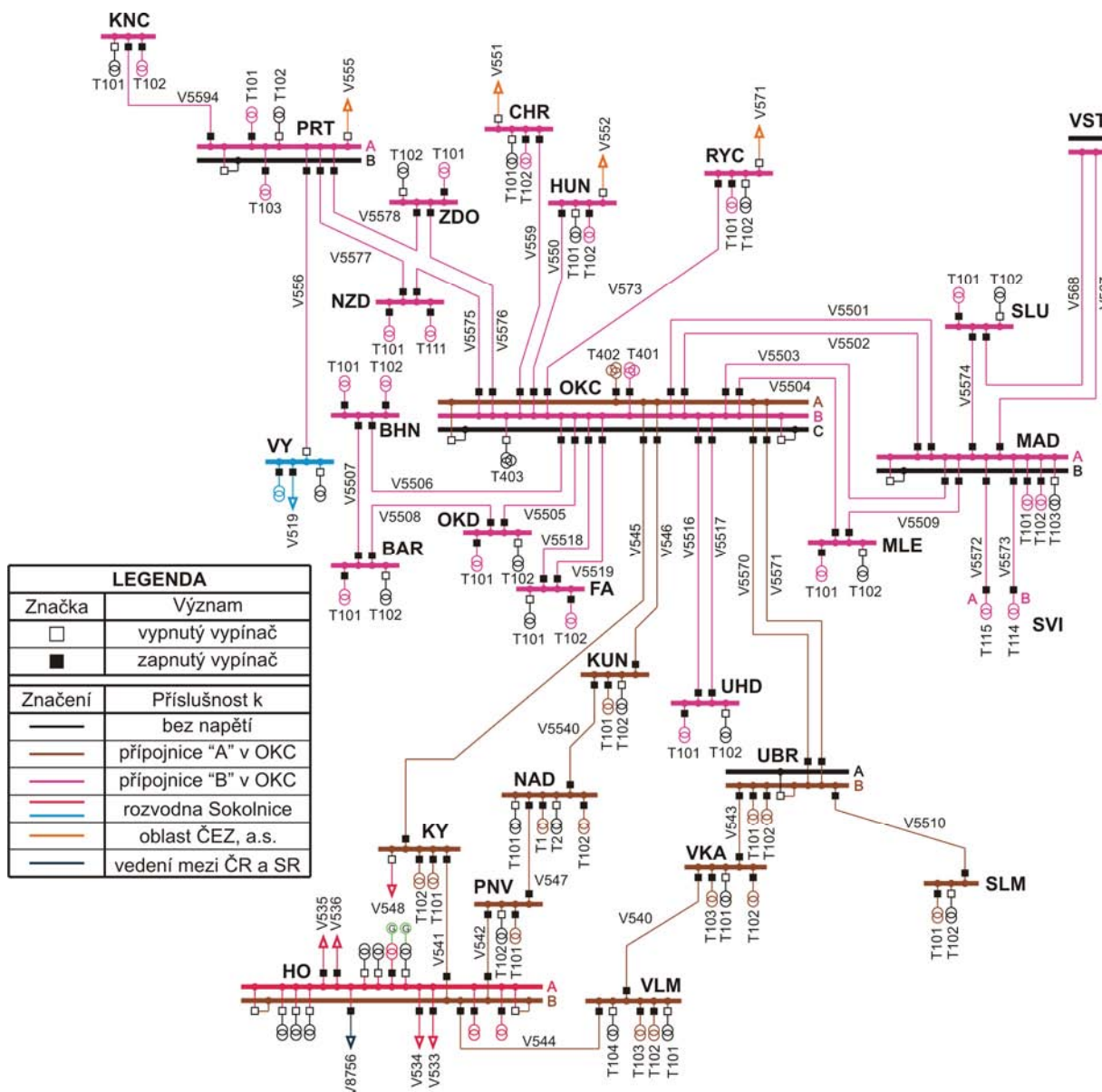
Kontrolu napěťových poměrů v uzlech sítě, resp. velikosti napětí budeme provádět s ohledem na předepsanou možnou odchylku $\pm 10\%$ od jmenovité hodnoty napětí, což znamená, že napětí v uzlech v žádném případě nesmí klesnout pod hodnotu 99 kV a naopak nesmí překročit hodnotu 121 kV. Maximální možné zatížení transformátorů a vedení je pak dáno jejich maximálním možným proudovým zatížením a u vedení pak ještě přenosovou schopností. Zatížení zkratovými výkony je, podobně jako u vedení a transformátorů, dáno zkratovou odolností jednotlivých rozvodů, uzlů.

6.1 Zapojení sítě bez můstku

Schéma sítě v základním zapojení v oblasti Otrokovice je zobrazeno na obr. 6.1. V otrokovické rozvodně (OKC) jsou pod napětím přípojnicové systémy „A“ (OKC-A) a „B“ (OKC-B), přičemž do přípojnice „A“ pracuje transformátor T402 a do přípojnice „B“ transformátor T401. Přípojnice „C“ (OKC-C) je v tomto případě nevyužita a transformátor T403 je vypnut. Z přípojnice „A“ je pak napájen okruh č. 7 a zbylé okruhy č. 1 až č. 6 jsou napájeny z přípojnice „B“. Odběry a dodávky výkonů v síti 110 kV odpovídají hodnotám v tab. 5.3.

Za takto definovaných podmínek byl proveden výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů pro tuto možnost zapojení sítě. Vypočtené hodnoty pak slouží jako referenční při porovnávání zapojení sítě bez můstku a zapojení sítě s můstkem.

Pozn.: Barevné značení ve schématech oblasti označuje příslušnost, resp. připojení daného vedení či přípojnice v rozvodnách na daný přípojnicový systém v rozvodně Otrokovice. Černou barvou jsou pak, mimo popisky, označeny přípojnice bez napětí.



Obr. 6.1: Schéma oblasti Otrokovice při zapojení bez můstku

6.2 Ustálený chod sítě při zapojení bez můstku

Všechny vypočtené hodnoty jsou prezentovány v následujících tabulkách. Vyhodnocení je pak provedeno na závěr kapitoly.

Tab. 6.1: Zatížení transformátorů 400/121 kV v rozvodně Otrokovice při zapojení bez můstku

Transfor- mátor	P	Q	ΔP	I_{lim}	I	i_{z400}
	[MW]	[MVar]	[MW]	[A]	[A]	[%]
T401	279,7	40,4	-0,131	1837	1381,4	75,20
T402	169,1	21,0	-0,052	1837	826,8	45,01
T403	-	-	-	-	-	-

Dodávané výkony z přenosové soustavy, ztráty činného výkonu a proudové zatížení transformátorů 400/121 kV v otrokovické rozvodně jsou uvedeny v tab. 6.1. Proudové zatížení (i_{z400}) je pak vypočteno z hodnoty okamžitého zatížení (I) a maximálního možného proudového zatížení transformátoru (I_{lim}).

Tab. 6.2: Napěťové poměry v jednotlivých rozvodnách při zapojení bez můstku

Roz- vodna	U	φ_u	Roz- vodna	U	φ_u
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
BAR	118,0	-7,80	OKD	118,0	-7,78
BHN	118,0	-7,81	PRT	114,6	-11,28
CHR	118,0	-7,90	RYC	117,3	-8,47
FA	118,1	-7,74	SLU	117,3	-8,32
HUN	117,0	-8,47	SVI-A	117,9	-7,91
KNC	114,1	-11,68	SVI-B	117,9	-7,91
MAD-A	117,9	-7,91	UHD	117,2	-8,32
MLE	118,1	-7,78	VST	117,6	-8,16
NZD	115,8	-9,99	ZDO	116,6	-9,29
OKC-B	118,1	-7,72	PNV	116,5	-6,80
OKC-A	119,0	-3,83	SLM	114,3	-6,77
HO	116,3	-6,80	UBR	116,7	-5,77
KUN	118,2	-5,52	VKA	116,1	-6,57
KY	116,1	-6,71	VLM	116,0	-6,87
NAD	118,2	-5,79			

Tab. 6.2 obsahuje vypočtené hodnoty velikosti napětí a fází napětí při zapojení sítě bez můstku. Dvojitou čarou jsou odděleny rozvodny napájené z přípojnice „A“ a „B“ v rozvodně Otrokovice.

Tab. 6.3-1: Poměry na vedení v oblasti Otrokovice při zapojení bez můstku

Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	U_1	U_2	P_1	Q_1	P_2	Q_2	ΔP	I	i_{zv}
			[kV]	[kV]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[A]	[A]
V5507	BAR	BHN	118,0	118,0	-0,5	0,8	0,5	-0,6	0,000	4,5	1,00
V5594	PRT	KNC	114,6	114,1	-9,3	-1,4	9,2	2,3	-0,028	48,1	10,69
V5574	MAD-A	SLU	117,9	117,3	-19,2	-4,5	19,1	4,9	-0,072	97,2	21,60
V567	MAD-A	VST	117,9	117,6	-5,2	-0,2	5,2	1,3	-0,012	26,3	5,84
V5509	MLE	MAD-A	118,1	117,9	-13,6	-1,5	13,6	1,7	-0,014	67,1	14,91
V5577	NZD	PRT	115,8	114,6	-32,8	-4,6	32,6	4,7	-0,240	165,9	36,87
V5575	OKC-B	NZD	118,1	115,8	-34,6	-5,9	34,2	5,9	-0,455	172,9	38,42
V5576	OKC-B	ZDO	118,1	116,6	-44,5	-7,1	44,1	6,7	-0,401	220,9	49,09
V5501	OKC-B	MAD-A	118,1	117,9	-15,9	-1,0	15,8	1,3	-0,024	77,8	17,29
V5502	OKC-B	MAD-A	118,1	117,9	-15,9	-1,0	15,8	1,3	-0,024	77,8	17,29
V5503	OKC-B	MAD-A	118,1	117,9	-16,4	-1,6	16,3	1,8	-0,023	80,5	17,89
V5504	OKC-B	MLE	118,1	118,1	-21,2	-2,5	21,2	2,6	-0,006	104,3	23,18
V5505	OKC-B	OKD	118,1	118,0	-13,6	-3,4	13,6	3,5	-0,006	68,7	15,27
V550	OKC-B	HUN	118,1	117,0	-32,1	-6,4	31,9	6,6	-0,212	160,7	35,71
V5506	OKC-B	BHN	118,1	118,0	-23,5	-5,1	23,5	5,2	-0,016	117,8	26,18
V559	OKC-B	CHR	118,1	118,0	-4,1	1,1	4,1	-0,1	-0,005	20,8	4,62
V573	OKC-B	RYC	118,1	117,3	-15,8	-1,9	15,7	2,9	-0,076	78,6	17,47
V5516	OKC-B	UHD	118,1	117,2	-19,4	-3,3	19,3	3,9	-0,108	97,1	23,12
V5517	OKC-B	UHD	118,1	117,2	-19,4	-3,3	19,3	3,9	-0,108	97,1	23,12
V5518	OKC-B	FA	118,1	118,1	-1,7	0,6	1,7	-0,3	0,000	8,7	1,93
V5519	OKC-B	FA	118,1	118,1	-1,7	0,6	1,7	-0,3	0,000	8,7	1,93
V5508	OKD	BAR	118,0	118,0	-12,3	-3,7	12,3	3,8	-0,003	63,1	14,02
V5572	SVI-A	MAD-A	117,9	117,9	-3,0	-2,8	3,0	2,8	0,000	20,0	4,44
V5573	SVI-B	MAD-A	117,9	117,9	-1,9	-1,7	1,9	1,7	0,001	12,7	2,82

Tab. 6.3-2: Poměry na vedení v oblasti Otrokovice při zapojení bez můstku (pokračování)

Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	U_1	U_2	P_1	Q_1	P_2	Q_2	ΔP	I	i_{zv}
			[kV]	[kV]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[A]	[A]
V568	VST	SLU	117,6	117,3	-5,2	-1,3	5,2	2,2	-0,009	27,7	6,16
V5578	ZDO	PRT	116,6	114,6	-31,6	-5,1	31,3	5,3	-0,363	159,9	35,53
V556	PRT	VY	114,6	114,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000	0,0	0,00
V544	HO	VLM	116,3	116,0	-2,9	-2,7	2,9	3,6	-0,005	23,0	5,11
V5540	KUN	NAD	118,2	118,2	-21,0	5,8	21,0	-5,6	-0,033	106,4	23,64
V547	NAD	PNV	118,2	116,5	-20,2	-6,4	20,0	7,3	-0,172	105,5	23,44
V541	KY	HO	116,1	116,3	-1,0	3,7	1,0	-2,8	-0,003	19,0	4,22
V5570	OKC-A	UBR	119,0	116,7	-48,9	-9,8	48,3	9,0	-0,638	243,1	54,02
V5571	OKC-A	UBR	119,0	116,7	-48,9	-9,8	48,3	9,0	-0,638	243,1	54,02
V545	OKC-A	KY	119,0	116,1	-38,3	-4,7	37,6	4,5	-0,716	188,2	41,82
V546	OKC-A	KUN	119,0	118,2	-33,0	3,3	32,7	-3,1	-0,308	160,8	35,73
V542	PNV	HO	116,5	116,3	-1,9	-5,2	1,9	5,5	-0,003	28,9	6,42
V543	UBR	VKA	116,7	116,1	-25,9	0,7	25,8	-0,4	-0,137	128,2	28,49
V5510	UBR	SLM	116,7	114,3	-29,9	-9,2	29,5	9,4	-0,447	156,2	44,63
V540	VKA	VLM	116,1	116,0	-13,9	1,8	13,9	-1,4	-0,027	69,8	15,51

V tab. 6.3 jsou vypsány vypočtené hodnoty napětí, výkonů na začátku a konci vedení. Dále tabulka poskytuje přehled o ztrátách činného výkonu na vedeních a zatížení vedení (i_{zv}). Směr toku výkonu je pak dán především počátečními a koncovými uzly vedení. Dá se ovšem rozeznat i ze znamének u hodnot výkonů podle tab. 3.1 při uvažování induktivního posunu proudu.

6.3 Ztráty činného výkonu v síti při zapojení bez můstku

Tab. 6.4: Celková bilance ztrát činného výkonu v síti při zapojení bez můstku

Ztráty činného výkonu	ΔP
	[MW]
na transformátorech 110/vn	-2,467
na transformátorech 400/121 kV	-0,183
na vedení	-5,331
Celková bilance	-7,981

Přehled ztrát činného výkonu na transformátorech a vedeních v oblasti při zapojení bez můstku je uveden v tab. 6.4.

6.4 Zkratové poměry v síti při zapojení bez můstku

V tab. 6.5 jsou vypsány zkratové odolnosti jednotlivých rozveden, resp. přípojnícových systémů v nich a dále pak vypočtené hodnoty počátečního rázového zkratového výkonu a počátečního rázového zkratového proudu v případě trojfázového ($^{(3)}S_k$, $^{(3)}I_k$) a jednofázového ($^{(1)}S_k$, $^{(1)}I_k$) zkratu. Tabulka je doplněna o hodnoty procentuálního zatížení zkratovým výkonem ($^{(3)}s_{zk}$, $^{(1)}s_{zk}$) vzhledem k jmenovité zkratové odolnosti.

Pro přehlednost jsou dvojitou čarou odděleny rozvodny napájené z přípojnice „A“ a přípojnice „B“.

Tab. 6.5: Zkratové poměry v síti při zapojení bez můstku

Roz- vodna	Zkratová odolnost	$^{(3)}S''_k$	$^{(3)}I''_k$	$^{(1)}S''_k$	$^{(1)}I''_k$	$^{(3)}s_{zk}$	$^{(1)}s_{zk}$
	[MVA]	[MVA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[%]	[%]
BAR	3500	2173,1	11,41	2206,3	11,58	62,09	63,04
BHN	3500	2252,9	11,82	2369,7	12,44	64,37	67,71
CHR	3500	838,4	4,40	590,9	3,10	23,95	16,88
FA	3500	1995,1	10,47	1904,9	10,00	57,00	54,43
HUN	3500	1133,6	5,95	1026,9	5,39	32,39	29,34
KNC	3500	447,2	2,35	438,1	2,30	12,78	12,52
MAD-A	5000	2267,9	11,90	2455,3	12,89	45,36	49,11
MLE	3500	2317,9	12,17	2421,1	12,71	66,23	69,17
NZD	3500	794,6	4,17	705,6	3,70	22,70	20,16
OKC-B	5000	2579,1	13,54	2861,4	15,02	51,58	57,23
OKD	3500	2216,8	11,64	2262,4	11,87	63,34	64,64
PRT	3500	728,0	3,82	791,7	4,16	20,80	22,62
RYC	3500	745,4	3,91	605,1	3,18	21,30	17,29
SLU	3500	1246,1	6,54	1153,4	6,05	35,60	32,95
SVI-A	3500	2134,4	11,20	2240,6	11,76	60,98	64,02
SVI-B	3500	2131,6	11,19	2229,9	11,70	60,90	63,71
UHD	3500	1401,8	7,36	1979,9	10,39	40,05	56,57
VST	3500	1020,8	5,36	840,6	4,41	29,17	24,02
ZDO	3500	1041,2	5,47	963,6	5,06	29,75	27,53
HO	3500	899,1	4,72	868,2	4,56	25,69	24,81
KUN	3500	938,1	4,92	844,9	4,43	26,80	24,14
KY	3500	853,7	4,48	876,6	4,60	24,39	25,05
NAD	3500	863,0	4,53	758,0	3,98	24,66	21,66
OKC-A	5000	2761,7	14,50	1869,5	9,81	55,23	37,39
PNV	3500	826,0	4,34	812,9	4,27	23,60	23,23
SLM	3500	642,5	3,37	598,2	3,14	18,36	17,09
UBR	3500	1397,8	7,34	1341,2	7,04	39,94	38,32
VKA	3500	954,9	5,01	873,3	4,58	27,28	24,95
VLM	3500	864,6	4,54	795,0	4,17	24,70	22,71

6.5 Vyhodnocení ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti při zapojení bez můstku

Napěťové poměry v uzlech oblasti Otrokovice jsou při zapojení bez můstku zcela v pořádku, resp. velikosti napětí jsou v přijatelných mezích, přičemž nejmenší hodnota napětí je v Konicích (KNC) a to 114,1 kV. Naopak nejvyšší hodnota napětí je v rozvodně Otrokovice na přípojnici „A“ (OKC-A), 119,1 kV. Velikost fáze napětí se pohybuje v hodnotách od 3,83° do 11,87°. Nejmenší hodnota fáze je v rozvodně Otrokovice na přípojnici „A“ (OKC-A), nejvyšší pak v Konicích (KNC). Všechny vypočtené hodnoty napěťových poměrů v jednotlivých uzlech jsou pak uvedeny v tab. 6.2.

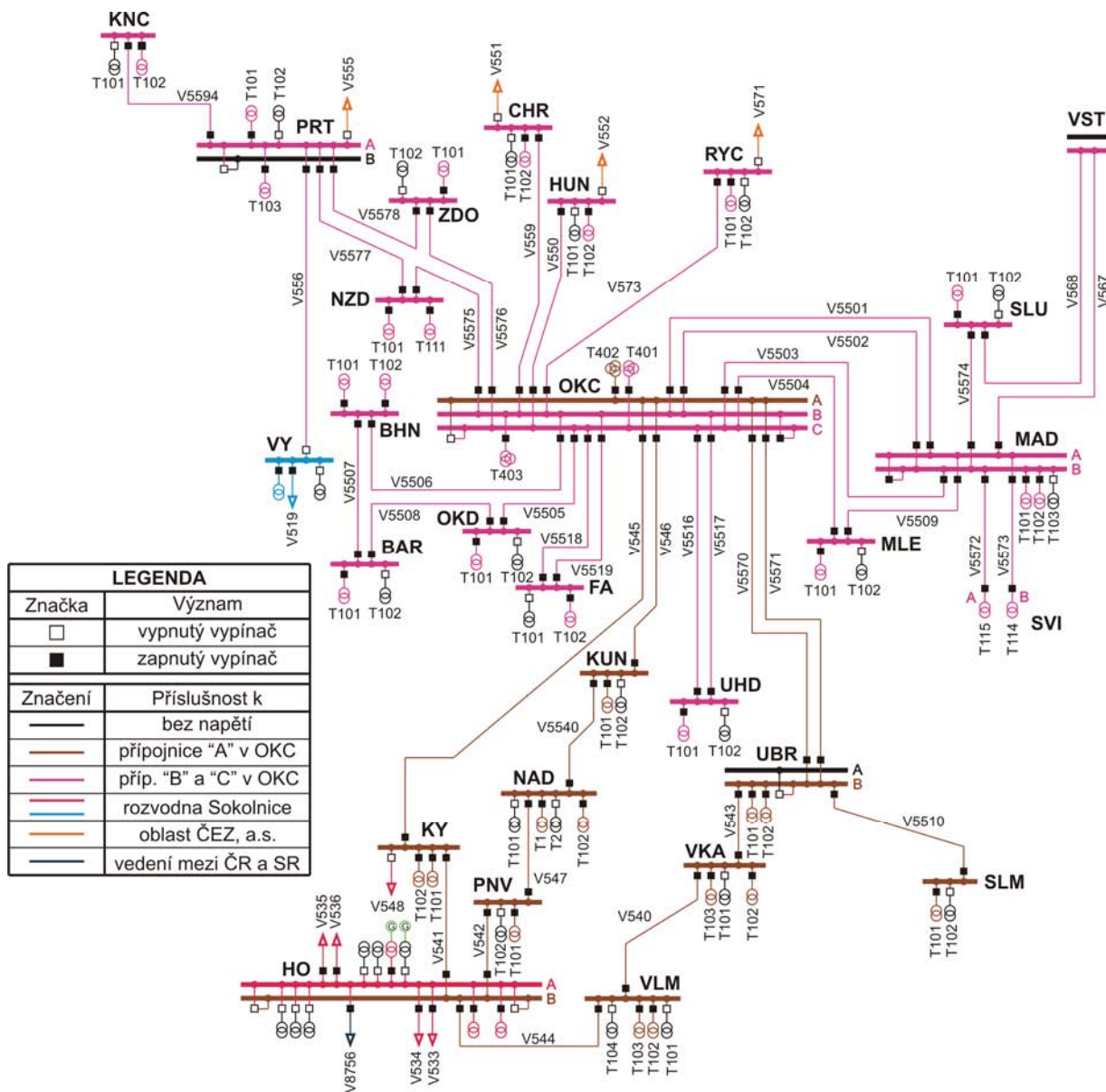
Žádný z transformátorů 400/121 kV není přetěžován. Transformátor T402, napájející okruh č. 7, je zatížen na 45,01 %, transformátor T401, napájející okruhy č. 1 až č. 6, je zatížen na 75,20 %, přičemž transformátor T402 dodává do sítě 110 kV výkon 169,1 MW a transformátor T401 výkon 279,7 MW

Zatížení u žádného vedení nepřekračuje maximální dovolenou hodnotu. Největší zatížení, 54,02 %, je pak zaznamenáno u vedení V5570 a V5571. Na vedení V541 se, z důvodu jeho nízkého zatížení, objevuje tzv. Ferrantiho jev, což znamená, že na konci vedení je vyšší napětí než na začátku.

Ztráty činného výkonu v oblasti, při zapojení bez můstku, jsou 7,981 MW.

Zkratová odolnost nebyla v žádné z rozvodn překročena. Maximální zatížení počátečním rázovým zkratovým výkonem byla vypočtena v rozvodně Malenovice ZPS. Při trojfázovém zkratu bylo zatížení 66,23 %, v případě jednofázového zkratu 69,17 %.

Nekreslená přípojnice „A“ v Otrokovicích (OKC-A) a do ní pracující transformátor T402 napájejí okruh č. 8 tak, jak je tomu při zapojení bez můstku. Schéma sítě oblasti Otrokovice, při můstkovém zapojení, je uvedeno na obr. 7.2.



Obr. 7.2: Schéma oblasti Otrokovice při zapojení sítě s můstkem

7.2 Ustálený chod sítě při můstkovém zapojení

Za předpokladu, že je síť zapojena dle obr. 7.2 a odběry (dodávky) v jednotlivých uzlech odpovídají hodnotám v tab. 5.3, byly provedeny výpočty ustáleného chodu sítě a zkratových poměrů pro tuto variantu zapojení. Vypočtené hodnoty jsou vyhodnoceny a porovnány s dosaženými hodnotami při zapojení sítě bez můstku, přičemž při kontrole a vyhodnocení se řídíme dle pokynů uvedených na začátku kapitoly 6.

Tab. 7.1: Zatížení transformátorů 400/121 kV v rozvodně Otrokovice při můstkovém zapojení

Transformátor	P	Q	ΔP	I_{lim}	I	i_{z400}	δI
	[MW]	[MVA _r]	[MW]	[A]	[A]	[%]	[%]
T401	121,8	48,3	-0,028	1837	637,2	34,69	-116,79
T402	169,1	21,0	-0,052	1837	826,8	45,01	0,00
T403	157,9	-8,4	-0,043	1837	768,4	41,83	-

Tab. 7.1 je, mimo obvyklé hodnoty, jenž byly popsány v předchozí kapitole, doplněna o změnu zatížení transformátorů (δI) při můstkovém zapojení oproti zapojení bez můstku.

Tab. 7.2: Napěťové poměry v jednotlivých uzlech sítě při můstkovém zapojení

Rozvodna	U	φ_u	δU	$\delta \varphi_u$
	[kV]	[°]	[%]	[%]
BAR	118,6	-3,94	0,51	-97,97
BHN	118,7	-3,94	0,59	-98,22
CHR	118,7	-4,03	0,59	-96,03
FA	118,8	-3,87	0,59	-100,00
HUN	117,7	-4,59	0,59	-84,53
KNC	114,7	-7,77	0,52	-50,32
MAD-A	118,6	-4,04	0,59	-95,79
MAD-B	118,6	-4,04	-	
MLE	118,7	-3,91	0,51	-98,98
NZD	116,5	-6,10	0,60	-63,77
OKC-B	118,8	-3,85	0,59	-100,52
HO	116,3	-6,80	0,00	0,00
KUN	118,2	-5,52	0,00	0,00
KY	116,1	-6,71	0,00	0,00
NAD	118,2	-5,79	0,00	0,00
OKC-A	119,0	-3,83	0,00	0,00

Rozvodna	U	φ_u	δU	$\delta \varphi_u$
	[kV]	[°]	[%]	[%]
OKC-C	118,8	-3,85	-	-
OKD	118,7	-3,91	0,59	-98,98
PRT	115,2	-7,37	0,52	-53,05
RYC	118,0	-4,59	0,59	-84,53
SLU	117,9	-4,44	0,51	-87,39
SVI-A	118,6	-4,03	0,59	-96,28
SVI-B	118,6	-4,04	0,59	-95,79
UHD	117,9	-4,44	0,59	-87,39
VST	118,2	-4,28	0,51	-90,65
ZDO	117,2	-5,41	0,51	-71,72
PNV	116,5	-6,80	0,00	0,00
SLM	114,3	-6,77	0,00	0,00
UBR	116,7	-5,77	0,00	0,00
VKA	116,1	-6,57	0,00	0,00
VLM	116,0	-6,86	0,00	-0,15

Napěťové poměry při zapojení sítě s můstkem jsou uvedeny v tab. 7.2. Ta je dále doplněna o vypočtené hodnoty, změny napětí a jeho fáze (δU , $\delta \varphi_u$) při můstkovém zapojení, oproti zapojení bez můstku. Uzly spadající do okruhu č. 7 jsou opět odděleny pro přehlednost dvojťou čarou od zbývajících uzlů v můstku.

Tab. 7.3-1: Poměry na vedení v oblasti Otrokovice při zapojení s můstkem

Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	U_1	U_2	P_1	Q_1	P_2	Q_2	ΔP	I	i_{zv}
			[kV]	[kV]	[MW]	[MVA _r]	[MW]	[MVA _r]	[MW]	[A]	[A]
V5507	BAR	BHN	118,6	118,7	-0,5	0,8	0,5	-0,7	0,000	4,5	1,00
V5594	PRT	KNC	115,2	114,7	-9,3	-1,4	9,2	2,3	-0,028	47,8	10,62
V5574	MAD-A	SLU	118,6	117,9	-19,2	-4,4	19,1	4,8	-0,071	96,6	21,47
V567	MAD-A	VST	118,6	118,2	-5,2	-0,1	5,2	1,3	-0,012	26,2	5,82
V5509	MLE	MAD-A	118,6	118,7	-13,6	-1,5	13,6	1,7	-0,014	66,7	14,82
V5577	NZD	PRT	116,5	115,2	-32,8	-4,6	32,6	4,7	-0,237	164,8	36,62
V5575	OKC-B	NZD	118,8	116,5	-34,6	-5,8	34,2	5,9	-0,449	171,8	38,18
V5576	OKC-C	ZDO	118,8	117,2	-44,5	-7,0	44,1	6,6	-0,396	219,5	48,78
V5501	OKC-B	MAD-A	118,8	118,6	-15,9	-1,0	15,8	1,3	-0,025	77,3	17,18
V5502	OKC-B	MAD-B	118,8	118,6	-15,9	-1,0	15,8	1,3	-0,025	77,3	17,18

Tab. 7.3-2: Poměry na vedení v oblasti Otrokovice při zapojení s můstkem (pokračování)

Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	U_1	U_2	P_1	Q_1	P_2	Q_2	ΔP	I	i_{zv}
			[kV]	[kV]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[A]	[A]
V5503	OKC-C	MAD-B	118,8	118,6	-16,4	-1,6	16,3	1,8	-0,024	80,1	17,80
V5504	OKC-C	MLE	118,8	118,7	-21,2	-2,5	21,2	2,6	-0,007	103,7	23,04
V5505	OKC-C	OKD	118,8	118,7	-13,6	-3,4	13,6	3,5	-0,006	68,3	15,18
V550	OKC-C	HUN	118,8	117,7	-32,1	-6,4	31,9	6,5	-0,210	159,8	35,51
V5506	OKC-B	BHN	118,8	118,7	-23,5	-5,1	23,5	5,2	-0,016	117,2	26,04
V559	OKC-B	CHR	118,8	118,7	-4,1	1,1	4,1	-0,1	-0,005	20,7	4,60
V573	OKC-B	RYC	118,8	118,0	-15,8	-1,9	15,7	2,9	-0,075	78,2	17,38
V5516	OKC-C	UHD	118,8	117,9	-19,4	-3,3	19,3	3,9	-0,106	96,5	22,98
V5517	OKC-B	UHD	118,8	117,9	-19,4	-3,3	19,3	3,9	-0,106	96,5	22,98
V5518	OKC-C	FA	118,8	118,8	-1,7	0,6	1,7	-0,3	0,000	8,7	1,93
V5519	OKC-B	FA	118,8	118,8	-1,7	0,6	1,7	-0,3	0,000	8,7	1,93
V5508	OKD	BAR	118,7	118,6	-12,3	-3,7	12,3	3,8	-0,001	62,8	13,96
V5572	SVI-A	MAD-A	118,6	118,6	-3,0	-3,8	3,0	2,8	-0,001	19,8	4,40
V5573	SVI-B	MAD-A	118,6	118,6	-1,9	-1,7	1,9	1,8	-0,001	12,7	2,82
V568	VST	SLU	118,2	117,9	-5,2	-1,3	5,2	2,2	-0,008	27,5	6,11
V5578	ZDO	PRT	117,2	115,2	-31,6	-5,0	31,3	5,3	-0,358	158,9	35,31
V556	PRT	VY	115,3	115,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000	0,0	0,00
V544	HO	VLM	116,3	116,0	-2,9	-2,7	2,9	3,6	-0,005	23,0	5,11
V5540	KUN	NAD	118,2	118,2	-21,0	5,8	21,0	-5,6	-0,033	106,4	23,64
V547	NAD	PNV	118,2	116,5	-20,2	-6,4	20,0	7,3	-0,172	105,5	23,44
V541	KY	HO	116,1	116,3	-1,0	3,7	1,0	-2,8	-0,003	19,0	4,22
V5570	OKC-A	UBR	119,0	116,7	-48,9	-9,8	48,3	9,0	-0,638	243,1	54,02
V5571	OKC-A	UBR	119,0	116,7	-48,9	-9,8	48,3	9,0	-0,638	243,1	54,02
V545	OKC-A	KY	119,0	116,1	-38,3	-4,7	37,6	4,5	-0,716	188,2	41,82
V546	OKC-A	KUN	119,0	118,2	-33,0	3,3	32,7	-3,1	-0,308	160,8	35,73
V542	PNV	HO	116,5	116,3	-1,9	-5,2	1,9	5,5	-0,003	28,9	6,42
V543	UBR	VKA	116,7	116,1	-25,9	0,7	25,8	-0,4	-0,137	128,2	28,49
V5510	UBR	SLM	116,7	114,3	-29,9	-9,2	29,5	9,4	-0,447	156,2	44,63
V540	VKA	VLM	116,1	116,0	-13,9	1,8	13,9	-1,4	-0,027	69,8	15,51

Tab. 7.3 je doplněna tab. 7.4, v níž jsou uvedeny hodnoty změny zatížení vedení při můstkovém zapojení oproti zapojení bez můstku.

Tab. 7.4-1: Změny zatížení vedení při můstkovém zapojení

Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	δI	Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	δI
			[%]				[%]
V5507	BAR	BHN	0,00	V5506	OKC-B	BHN	-0,51
V5594	PRT	KNC	-0,63	V559	OKC-B	CHR	-0,48
V5574	MAD-A	SLU	-0,62	V573	OKC-B	RYC	-0,51
V567	MAD-A	VST	-0,38	V5516	OKC-C	UHD	-0,62
V5509	MLE	MAD-A	-0,60	V5517	OKC-B	UHD	-0,62
V5577	NZD	PRT	-0,67	V5518	OKC-C	FA	0,00
V5575	OKC-B	NZD	-0,64	V5519	OKC-B	FA	0,00
V5576	OKC-C	ZDO	-0,64	V5508	OKD	BAR	-0,48
V5501	OKC-B	MAD-A	-0,65	V5572	SVI-A	MAD-B	-1,01
V5502	OKC-B	MAD-B	-0,65	V5573	SVI-B	MAD-A	0,00
V5503	OKC-C	MAD-B	-0,50	V568	VST	SLU	-0,73

Tab. 7.4-2: Změny zatížení vedení při můstkovém zapojení (pokračování)

Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	δI [%]
V5504	OKC-C	MLE	-0,58
V5505	OKC-C	OKD	-0,59
V550	OKC-C	HUN	-0,56
V544	HO	VLM	0,00
V5540	KUN	NAD	0,00
V547	NAD	PNV	0,00
V541	KY	HO	0,00
V5570	OKC-A	UBR	0,00
V5571	OKC-A	UBR	0,00

Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	δI [%]
V5578	ZDO	PRT	-0,63
V556	PRT	VY	0,00
V545	OKC-A	KY	0,00
V546	OKC-A	KUN	0,00
V542	PNV	HO	0,00
V543	UBR	VKA	0,00
V5510	UBR	SLM	0,00
V540	VKA	VLM	0,00

7.3 Ztráty činného výkonu v síti při můstkovém zapojení

Tab. 7.5: Celková bilance ztrát činného výkonu v síti při můstkovém zapojení

Ztráty činného výkonu	ΔP [MW]	$\delta \Delta P$ [%]
na transformátorech 110/vn	-2,467	0,00
na transformátorech 400/121 kV	-0,123	-48,78
na vedení	-5,308	-0,43
Celková bilance	-7,898	-1,05

Tab. 7.5 je doplněna o vypočtené hodnoty, jež udávají v procentech, o kolik se změnily ztráty činného výkonu při můstkovém zapojení oproti zapojení bez můstku.

7.4 Zkratové poměry při můstkovém zapojení

Tab. 7.6 je rozšířena o hodnoty změny velikosti zkratového výkonu a proudu při můstkovém zapojení oproti zapojení bez můstku pro trojfázový i jednofázový zkrat.

Vybarvením příslušné buňky tabulky je upozorněno na hodnotu zkratového výkonu, jež se blíží k hodnotě maximální zkratové odolnosti. Jako spodní hranice byla zvolena hranice 85 % zkratové odolnosti rozvodny.

Tab. 7.6-1: Zkratové poměry v síti při můstkovém zapojení

Rozvodna	Zkratová odolnost [MVA]	$^{(3)}S''_k$ [MVA]	$^{(3)}I''_k$ [kA]	$^{(1)}S''_k$ [MVA]	$^{(1)}I''_k$ [kA]	$^{(3)}S_{zk}$ [%]	$^{(1)}S_{zk}$ [%]	$\delta^{(3)}S''_k$ [%]	$\delta^{(3)}I''_k$ [%]	$\delta^{(1)}S''_k$ [%]	$\delta^{(1)}I''_k$ [%]
BAR	3500	3162,9	16,60	2815,5	14,78	90,37	80,44	31,29	31,29	21,64	21,65
BHN	3500	3336,7	17,51	3087,5	16,21	95,33	88,21	32,48	32,48	23,25	23,26
CHR	3500	949,6	4,98	626,4	3,29	27,13	17,90	11,71	11,72	5,67	5,78
FA	3500	2799,1	14,69	2343,0	12,30	79,97	66,94	28,72	28,72	18,70	18,70
HUN	3500	1346,8	7,07	1138,6	5,98	38,48	32,53	15,83	15,83	9,81	9,87
KNC	3500	476,9	2,50	457,0	2,40	13,63	13,06	6,23	6,23	4,14	4,17
MAD-A	5000	3348,9	17,58	3219,4	16,90	66,98	64,39	32,28	32,28	23,73	23,73
MAD-B	5000	3348,9	17,58	3219,4	16,90	66,98	64,39	-	-	-	-
MLE	3500	3479,2	18,26	3175,4	16,67	99,41	90,73	33,38	33,38	23,75	23,76
NZD	3500	895,1	4,70	756,6	3,97	25,57	21,62	11,23	11,24	6,74	6,80

Tab. 7.6-2: Zkratové poměry v oblasti Otrokovice při můstkovém zapojení (pokračování)

Roz- vodna	Zkratová odolnost	$^{(3)}S''_k$	$^{(3)}I''_k$	$^{(1)}S''_k$	$^{(1)}I''_k$	$^{(3)}S_{zk}$	$^{(1)}S_{zk}$	$\delta^{(3)}S''_k$	$\delta^{(3)}I''_k$	$\delta^{(1)}S''_k$	$\delta^{(1)}I''_k$
	[MVA]	[MVA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
OKC-B	5000	4114,9	21,60	3988,5	20,93	82,30	79,77	37,32	37,32	28,26	28,24
OKC-C	5000	4114,9	21,60	3988,5	20,93	82,30	79,77	-	-	-	-
OKD	3500	3257,4	17,10	2908,3	15,26	93,07	83,09	31,95	31,95	22,21	22,21
PRT	3500	811,4	4,26	856,3	4,49	23,18	24,47	10,28	10,28	7,54	7,35
RYC	3500	832,6	4,37	642,4	3,37	23,79	18,35	10,47	10,48	5,81	5,64
SLU	3500	1505,7	7,90	1294,2	6,79	43,02	36,98	17,24	17,25	10,88	10,90
SVI-A	3500	3058,6	16,05	2855,6	14,99	87,39	81,59	30,22	30,22	21,54	21,55
SVI-B	3500	3054,7	16,03	2839,4	14,90	87,28	81,13	30,22	30,22	21,47	21,48
UHD	3500	1745,8	9,16	2433,3	12,77	49,88	69,52	19,70	19,70	18,63	18,64
VST	3500	1186,7	6,23	912,5	4,79	33,91	26,07	13,98	13,98	7,88	7,93
ZDO	3500	1221,8	6,41	1061,9	5,57	34,91	30,34	14,78	14,78	9,26	9,16
HO	3500	899,1	4,72	868,3	4,56	25,69	24,81	0,00	0,00	0,01	0,00
KUN	3500	938,1	4,92	845,0	4,44	26,80	24,14	0,00	0,00	0,01	0,23
KY	3500	853,7	4,48	876,7	4,60	24,39	25,05	0,00	0,00	0,01	0,00
NAD	3500	863,0	4,53	758,1	3,98	24,66	21,66	0,00	0,00	0,01	0,00
OKC-A	5000	2761,8	14,50	1873,0	9,83	55,24	37,46	0,00	0,01	0,19	0,20
PNV	3500	826,0	4,34	812,9	4,27	23,60	23,23	0,00	0,00	0,00	0,00
SLM	3500	642,5	3,37	598,2	3,14	18,36	17,09	0,00	0,00	0,00	0,00
UBR	3500	1397,8	7,34	1341,8	7,04	39,94	38,34	0,00	0,00	0,04	0,00
VKA	3500	954,9	5,01	873,4	4,58	27,28	24,95	0,00	0,00	0,01	0,00
VLM	3500	864,6	4,54	795,1	4,17	24,70	22,72	0,00	0,00	0,01	0,00

7.5 Vyhodnocení ustáleného chodu sítě a zkratových poměrů v síti při můstkovém zapojení

Napěťové poměry v uzlech sítě v části oblasti napájené z můstku se při můstkovém zapojení ve všech ohledech zlepší. Zároveň v žádném z uzlů nedochází k překročení daných mezí pro napětí. Změna velikosti napětí v uzlech při tomto zapojení se pohybuje okolo 0,5 %, přesné hodnoty viz. tab. 7.2. Fáze napětí se také výrazně zlepší, dochází k její zmenšení až o 100 % oproti původní hodnotě při zapojení bez můstku.

Zatížení transformátorů 400/121 kV v otrokovické rozvodně se sníží, v případě transformátoru T402 zůstává stejné. Jelikož transformátory T401 a T403 pracují paralelně do jednoho uzlu (přípojnice „B“ a „C“ jsou spojeny příčným spínačem přípojníc, a tvoří tak jeden uzel) rozdělí si zatížení mezi sebe tak jak je uvedeno v tab. 7.1.

Z hlediska poměrů na vedení nedochází při stávajících odběrech a zapojení, k výrazným změnám v jejich zatížení. Žádné vedení není přetíženo a zatížení vedení se mění maximálně o 1 %, a to pouze u jednoho vedení.

Ztráty činného výkonu se vlivem zapojení s můstkem zmenšily na hodnotu 7,898 MW. Rozdíl mezi první a druhou variantou zapojení je 1,05 %, což odpovídá výkonu 0,083 MW.

Zkratové výkony a proudy se při můstkovém zapojení zvýší. Z důvodu připojení dalšího transformátoru 400/121 kV se zvýší příspěvek zkratového výkonu ze sítě 400 kV, a tím se zvýší i příspěvky v celé oblasti Otrokovice.

V žádné z rozvodn nepřesahují vypočtené hodnoty zkratových výkonů zkratovou odolnost. Jak vyplývá z tab. 6.5 a tab. 7.5, zkratová odolnost je ve všech rozvodnách 3500 MVA, výjma rozvodn Otrokovice (OKC) a Mladcová (MAD), ty mají zkratovou odolnost 5000 MVA. Nejvyšší zkratové výkony a proudy byly vypočteny v rozvodnách Otrokovice Barum (BAR), Otrokovice Bahňák (BHN), Otrokovice ČD (OKD), Malenovice ZPS (MLE) a Zlín Svit (SVI). Je to především proto, že rozvodny v okruzích č. 3 a č. 4 jsou situovány poměrně blízko u sebe, vedení mezi těmito uzly má výrazně menší délku, než v ostatních případech, a tím také menší zkratovou impedanci, což způsobuje tak velké zkratové příspěvky na jejich přípojnícový systémech.

V případě trojfázového zkratu dosahovalo nejvyšší zatížení zkratovým výkonem přes 90 % jmenovité hodnoty zkratové odolnosti. Největší zatížení pak bylo vypočteno v rozvodně Malenovice ZPS (MLE), tam dosahuje 99,41 %. Při jednofázovém zkratu byly vypočteny nejvyšší hodnoty zatížení pouze v rozvodnách Otrokovice Bahňák (BHN) a Malenovice ZPS (MLE). V Malenovicích dosahuje zatížení zkratovým výkonem, v tomto případě 90,73 %.

8 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ PŘI MIMOŘÁDNÝCH STAVECH

Doposud byl ustálený chod sítě počítán za normálního, bezporuchového stavu sítě. Nyní se zaměříme na výpočet ustáleného chodu při vybraných, mimořádných stavech, jenž se mohou v běžném provozu distribuční sítě 110 kV v oblasti Otrokovice vyskytnout.

V této části se zaměříme na výpočet ustáleného chodu sítě při výpadcích vybraných prvků sítě v oblasti Otrokovice. Tyto výpadky mají simulovat plánované i neplánované odstavení určitých zařízení v síti, a zkoumá se pak vliv těchto mimořádných stavů na napěťové poměry, zatížení transformátorů a především pak zatížení vedení. Pro doplnění jsou porovnávány i ztráty činného výkonu v síti při těchto mimořádných stavech.

Kontrolu těchto veličin provádíme obdobně, jak je uvedeno v kapitole 6. Hlídáme tedy velikost napětí v uzlech tak, aby se nelišila o více jak $\pm 10\%$ jmenovité hodnoty a kontrolujeme zatížení transformátorů a vedení v závislosti na jejich maximálním proudovém zatížení.

Jako výchozí zapojení pro tyto simulace uvažujeme zapojení s můstkem, obr. 7.2. Hodnoty odebíraných výkonů v oblasti Otrokovice jsou dány tab. 5.3. Jelikož se simulované výpadky zařízení budou vyskytovat v oblasti napájené z můstku (okruhy č. 1 až č. 6), nebudou v dalším uváděny vypočtené hodnoty v okruhu č. 7. Tento okruh je, jak již bylo několikrát řečeno, napájen samostatně z přípojnice „A“ v Otrokovicích (OKC-A) a změna zapojení sítě ve zbylých částech oblasti napájených z můstku nemá vliv na sledované hodnoty v tomto okruhu. Nejlépe je to patrné při porovnání hodnot ustáleného chodu a zkratových poměrů při zapojení sítě bez a s můstkem v předchozí kapitole.

Vypočtené hodnoty ustáleného chodu sítě v těchto mimořádných stavech budou porovnávány s vypočtenými hodnotami za běžného, bezporuchového provozu sítě při můstkovém zapojení.

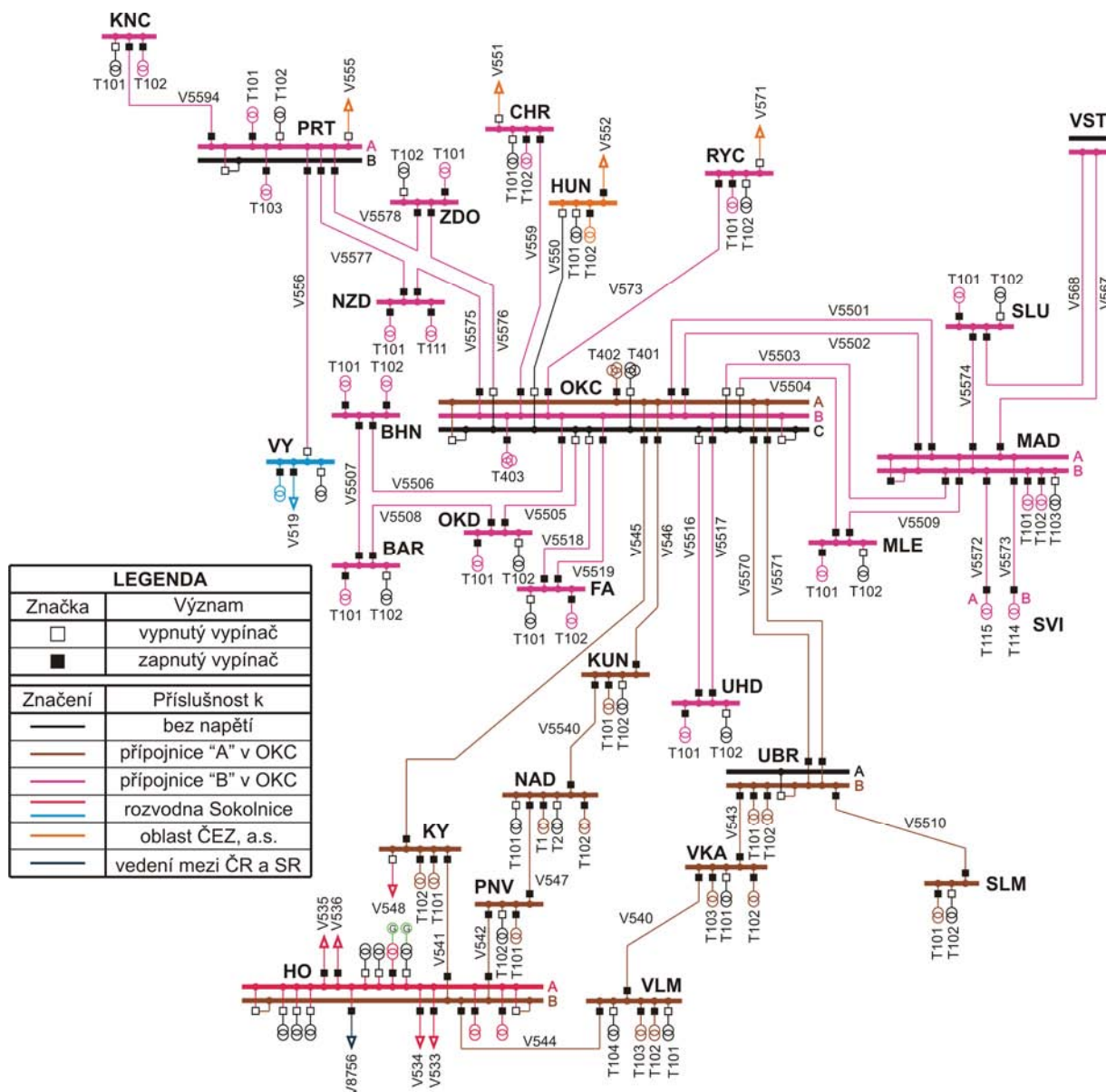
Po uvážení bylo navrženo provést kontrolu sledovaných veličin v případě těchto mimořádných stavů:

1. výpadek přípojnice „C“ v otrokovické rozvodně (OKC-C),
2. výpadek vedení V5501, V5502 a V5506.

8.1 Výpadek přípojnice „C“ v otrokovické rozvodně

Předpokládáme tedy, že došlo k poruše na přípojnicovém systému „C“ v rozvodně Otrokovice (OKC-C). Systémy ochran zareagují a vypnou vypínače všech vedení připojených na tuto přípojnicu, vypínač transformátoru T401 a dojde také k rozpojení příčného spínače přípojníc. V provozu zde tedy zůstávají přípojnicové systémy „A“ (OKC-A) a „B“ (OKC-B). V rozvodně Mladcová pak zůstávají využity oba přípojnicové systémy tak, jak je tomu ve stavu bez poruchy. Dokud na tento stav nezareagují dispečeri a neprovedou přepojení sítě, nachází se síť v takto popsaném zapojení. Konfigurace sítě v oblasti Otrokovice při tomto mimořádném stavu je pak zobrazena na obr. 8.1.

Vedení V5576, V5505, V5518, V5516, V5503 a V5504 jsou v této chvíli odpojeny pouze ze strany otrokovické rozvodny a jsou tedy ve stavu naprázdno. Vedení V550 je odpojeno na obou stranách, tedy i v Hulíně (HUN). Tato rozvodna je v daném okamžiku bez napětí. Napájení proto přebírá oblast Prosenice (ČEZ) vedením V552.



Obr. 8.1: Schéma oblasti Otrokovice při poruše přípojnice „C“ v rozvodně Otrokovice

Tab. 8.1: Zatížení transformátorů 400/121 kV při výpadku přípojnice „C“ v rozvodně Otrokovice

Transformátor	P	Q	ΔP	I_{lim}	I	i_{z400}	δI
	[MW]	[MVar]	[MW]	[A]	[A]	[%]	[%]
T401	-	-	-	-	-	-	-
T402	169,1	21,0	-0,052	1837	826,8	45,01	0,00
T403	251,0	47,3	-0,118	1837	1274,3	69,37	39,70

Tab. 8.1 je doplněna o procentuální změny zatížení v tomto mimořádném stavu oproti hodnotám ustáleného chodu sítě při zapojení s můstkem.

Tab. 8.2-1: Napěťové poměry v uzlech při výpadku přípojnice „C“ v Otrokovicích

Rozvodna	U	φ_u	δU	$\delta \varphi_u$
	[kV]	[°]	[%]	[%]
BAR	115,4	-6,1	-2,77	34,98
BHN	115,5	-6,0	-2,77	34,33

Rozvodna	U	φ_u	δU	$\delta \varphi_u$
	[kV]	[°]	[%]	[%]
OKD	115,4	-6,1	-2,86	35,48
PRT	105,6	-15,0	-9,09	50,70

Tab. 8.2-2: Napěťové poměry v uzlech při výpadku přípojnice „C“ v Otrokovicích (pokračování)

<i>Roz- vodna</i>	<i>U</i> [kV]	φ_u [°]	δU [%]	$\delta \varphi_u$ [%]
CHR	115,6	-6,1	-2,68	33,39
FA	115,7	-5,9	-2,68	34,52
KNC	105,1	-15,4	-11,99	70,23
MAD-A	115,2	-6,3	-0,78	-6,85
MAD-B	115,2	-6,3	-2,95	35,67
MLE	115,1	-6,4	-3,04	36,48
NZD	108,9	-11,5	-8,54	49,61
OKC-B	115,7	-5,9	-2,85	34,64

<i>Roz- vodna</i>	<i>U</i> [kV]	φ_u [°]	δU [%]	$\delta \varphi_u$ [%]
RYC	114,9	-6,6	-2,70	30,87
SLU	114,6	-6,7	-2,88	33,83
SVI-A	115,2	-6,3	-2,95	35,83
SVI-B	115,2	-6,3	-2,95	35,67
UHD	113,9	-7,1	-3,51	37,64
VST	114,9	-6,5	-2,87	34,56
ZDO	105,0	-15,9	-11,62	66,06

V tab. 8.2 nejsou uvedeny napěťové poměry v rozvodně Hulín, jelikož tato rozvodna je nyní napájena z oblasti Prosenice (ČEZ). V tabulce jsou dále uvedeny procentní změny velikostí napětí a jejich fáze v porovnání s hodnotami při ustáleném chodu sítě v zapojení s můstkem.

Následující tab. 8.3 uvádí vypočtené hodnoty poměrů na vedení při daném výpadku. Opět je tabulka doplněna o hodnoty procentuální změny zatížení v tomto mimořádném stavu oproti zatížení při normálním provozu v zapojení sítě s můstkem.

Tab. 8.3: Poměry na vedení v případě výpadku přípojnice „C“ v rozvodně Otrokovice

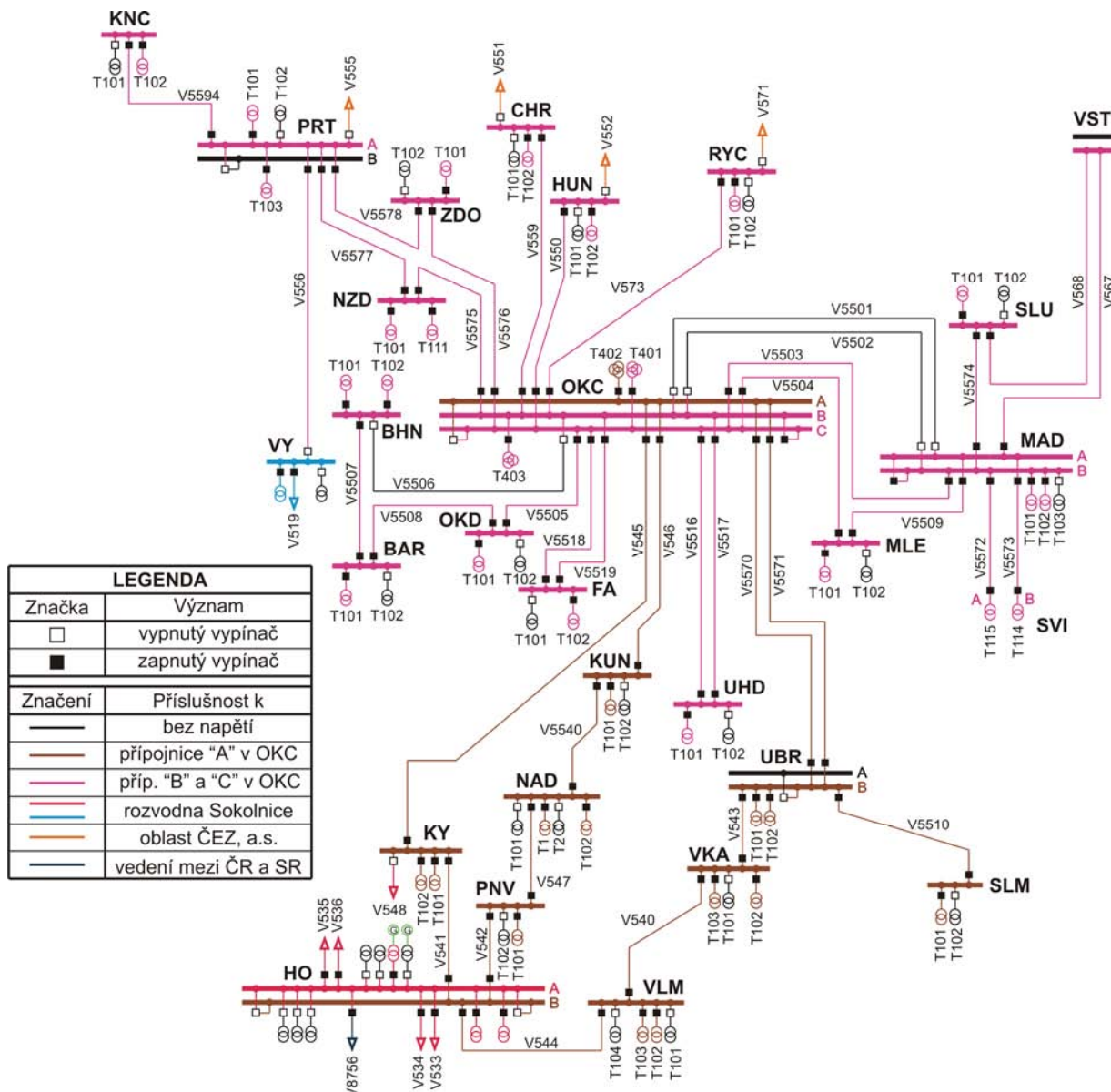
<i>Vedení</i>	<i>Poč. uzel</i>	<i>Konc. uzel</i>	<i>U</i> ₁ [kV]	<i>U</i> ₂ [kV]	<i>P</i> ₁ [MW]	<i>Q</i> ₁ [MVar]	<i>P</i> ₂ [MW]	<i>Q</i> ₂ [MVar]	ΔP [MW]	<i>I</i> [A]	<i>i</i> _{zv} [A]	δI [A]
V5507	BHN	BAR	115,5	115,4	-13,1	-4,0	13,1	4,1	-0,006	68,7	15,27	93,45
V5594	PRT	KNC	105,6	105,1	-9,3	-1,6	9,2	2,4	-0,033	52,3	11,62	8,60
V5574	MAD-B	SLU	115,2	114,6	-19,2	-4,6	19,1	4,9	-0,075	99,6	22,13	3,01
V567	MAD-A	VST	115,2	114,9	-5,2	-0,2	5,2	1,4	-0,012	27,0	6,00	2,96
V5509	MAD-A	MLE	115,2	115,1	-7,6	-0,8	7,5	1,0	-0,005	38,2	8,49	-74,61
V5577	NZD	PRT	108,9	105,6	-77,9	-15,7	76,4	11,4	-1,558	422,0	93,78	60,95
V5575	OKC-B	NZD	115,7	108,9	-82,1	-24,7	79,3	17,0	-2,821	429,7	95,49	60,02
V5501	OKC-B	MAD-A	115,7	115,2	-34,7	-3,3	34,6	3,3	-0,124	174,1	38,69	55,60
V5502	OKC-B	MAD-B	115,7	115,2	-34,7	-3,3	34,6	3,3	-0,124	174,1	38,69	55,60
V5506	OKC-B	BHN	115,7	115,5	-37,2	-8,6	37,1	8,6	-0,042	190,4	42,31	38,45
V559	OKC-B	CHR	115,7	115,6	-4,1	1,1	4,1	-0,1	-0,005	20,5	4,56	-0,98
V573	OKC-B	RYC	115,7	114,9	-15,8	-2,0	15,7	3,0	-0,079	80,3	17,84	2,62
V5517	OKC-B	UHD	115,7	113,9	-39,1	-7,5	38,7	7,3	-0,455	199,4	47,48	51,60
V5519	OKC-B	FA	115,7	115,7	-3,4	1,2	3,4	-0,9	-0,001	17,8	3,96	51,12
V5508	BAR	OKD	115,4	115,4	-1,3	0,4	1,3	-0,4	-0,001	6,7	1,49	-837,31
V5572	SVI-A	MAD-B	115,2	115,2	-3,0	-2,9	3,0	3,0	0,001	21,0	4,67	5,71
V5573	SVI-B	MAD-A	115,2	115,2	-1,9	-1,8	1,9	1,9	-0,001	13,4	2,98	5,22
V568	VST	SLU	114,9	114,6	-5,2	-1,4	5,2	2,1	-0,009	28,3	6,29	2,83
V5578	ZDO	PRT	105,6	105,0	-12,5	-0,1	12,4	1,0	-0,067	68,6	15,24	-131,63
V556	PRT	VY	105,6	105,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000	0,0	0,00	0,00

Tab. 8.4: Balance ztrát činného výkonu v případě výpadku přípojnice „C“ v rozvodně Otrokovice

Ztráty činného výkonu	ΔP	$\delta \Delta P$
	[MW]	[%]
na transformátorech 110/vn	-2,467	0,00
na transformátorech 400/121 kV	-0,170	27,65
na vedení	-8,544	37,87
Celková bilance	-11,181	29,36

8.2 Výpadek vedení V5501, V5502 a V5506

Například z důvodu nutné opravy poruchy nebo běžné revize může nastat případ, kdy je nutné vypnout některá vedení. V našem případě byly vybrány vedení V5501, V5502 a V5506. Předpokládáme tedy, že jsou na nich prováděny práce, což znamená, že vedení musí být na obou stranách vypnuty a minimálně na jedné straně zabezpečeny zemními noži (uzemněny). Odebírané a dodávané výkony v uzlech se nemění a korespondují s hodnotami v tab. 5.3. Za tohoto předpokladu bude proveden pro tento mimořádný stav výpočet ustáleného chodu sítě. Na obr. 8.2 je zobrazeno schéma oblasti Otrokovice při výpadku výše zmíněných vedení.



Obr. 8.2: Schéma oblasti Otrokovice při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506

Tab. 8.5: Zatížení transformátorů 400/121 kV při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506

Transformátor	P	Q	ΔP	I_{lim}	I	i_{z400}	δI
	[MW]	[MVar]	[MW]	[A]	[A]	[%]	[%]
T401	121,9	48,8	-0,028	1837	638,6	34,76	0,22
T402	169,1	21,0	-0,052	1837	826,8	45,01	0,00
T403	157,9	-7,8	-0,043	1837	768,9	41,86	0,07

Tab. 8.5 uvádí zatížení transformátorů 400/121 kV v rozvodně Otrokovice při výpadech výše zmíněných vedení. V tabulce jsou dále uvedeny hodnoty změny zatížení transformátorů v řešeném mimořádném stavu oproti běžnému stavu sítě při můstkovém zapojení.

Tab. 8.6: Napěťové poměry v uzlech sítě při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506

Rozvodna	U	φ_u	δU	$\delta \varphi_u$
	[kV]	[°]	[%]	[%]
BAR	118,4	-4,1	-0,17	3,67
BHN	118,3	-4,2	-0,34	5,97
CHR	118,7	-4,0	0,00	0,25
FA	118,7	-3,9	-0,08	0,26
HUN	117,7	-4,6	0,00	0,22
KNC	114,7	-7,8	0,00	0,13
MAD-A	118,3	-4,2	-0,25	4,49
MAD-B	118,3	-4,2	-0,25	4,49
MLE	118,7	-4,0	0,00	1,26
NZD	116,4	-6,1	-0,09	0,16
OKC-B	118,7	-3,9	-0,08	0,26

Rozvodna	U	φ_u	δU	$\delta \varphi_u$
	[kV]	[°]	[%]	[%]
OKC-C	118,7	-3,9	-0,08	0,26
OKD	118,5	-4,0	-0,17	2,74
PRT	115,2	-7,4	0,00	0,14
RYC	117,9	-4,6	-0,08	0,22
SLU	117,7	-4,6	-0,17	4,10
SVI-A	118,3	-4,2	-0,25	4,73
SVI-B	118,3	-4,2	-0,25	4,49
UHD	117,9	-4,5	0,00	0,22
VST	118,0	-4,5	-0,17	4,46
ZDO	117,2	-5,4	0,00	0,00

Tab. 8.6 uvádí hodnoty napěťových poměrů v síti v případě řešeného mimořádného stavu a uvádí také změny hodnot napětí a jejich fází oproti stavu běžného provozu sítě v můstkovém zapojení.

Tab. 8.7-1: Poměry na vedení při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506

Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	U_1	U_2	P_1	Q_1	P_2	Q_2	ΔP	I	i_{zy}	δI
			[kV]	[kV]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]	[MW]	[A]	[A]	[A]
V5507	BHN	BAR	115,5	115,4	-13,1	-4,0	13,1	4,1	-0,006	68,7	15,27	93,45
V5594	PRT	KNC	105,6	105,1	-9,3	-1,6	9,2	2,4	-0,033	52,3	11,62	8,60
V5574	MAD-B	SLU	115,2	114,6	-19,2	-4,6	19,1	4,9	-0,075	99,6	22,13	3,01
V567	MAD-A	VST	115,2	114,9	-5,2	-0,2	5,2	1,4	-0,012	27,0	6,00	2,96
V5509	MAD-A	MLE	115,2	115,1	-7,6	-0,8	7,5	1,0	-0,005	38,2	8,49	-74,61
V5577	NZD	PRT	108,9	105,6	-77,9	-15,7	76,4	11,4	-1,558	422,0	93,78	60,95
V5575	OKC-B	NZD	115,7	108,9	-82,1	-24,7	79,3	17,0	-2,821	429,7	95,49	60,02
V5501	OKC-B	MAD-A	115,7	115,2	-34,7	-3,3	34,6	3,3	-0,124	174,1	38,69	55,60
V5502	OKC-B	MAD-B	115,7	115,2	-34,7	-3,3	34,6	3,3	-0,124	174,1	38,69	55,60
V5506	OKC-B	BHN	115,7	115,5	-37,2	-8,6	37,1	8,6	-0,042	190,4	42,31	38,45
V559	OKC-B	CHR	115,7	115,6	-4,1	1,1	4,1	-0,1	-0,005	20,5	4,56	-0,98
V573	OKC-B	RYC	115,7	114,9	-15,8	-2,0	15,7	3,0	-0,079	80,3	17,84	2,62
V5517	OKC-B	UHD	115,7	113,9	-39,1	-7,5	38,7	7,3	-0,455	199,4	47,48	51,60

Tab. 8.7-2: Poměry na vedení při výpadku vedení V5501, V5502 a V5506 (pokračování)

Vedení	Poč. uzel	Konc. uzel	U_1	U_2	P_1	Q_1	P_2	Q_2	ΔP	I	i_{zv}	δI
			[kV]	[kV]	[MW]	[MVA _r]	[MW]	[MVA _r]	[MW]	[A]	[A]	[A]
V5519	OKC-B	FA	115,7	115,7	-3,4	1,2	3,4	-0,9	-0,001	17,8	3,96	51,12
V5508	BAR	OKD	115,4	115,4	-1,3	0,4	1,3	-0,4	-0,001	6,7	1,49	-837,31
V5572	SVI-A	MAD-B	115,2	115,2	-3,0	-2,9	3,0	3,0	0,001	21,0	4,67	5,71
V5573	SVI-B	MAD-A	115,2	115,2	-1,9	-1,8	1,9	1,9	-0,001	13,4	2,98	5,22
V568	VST	SLU	114,9	114,6	-5,2	-1,4	5,2	2,1	-0,009	28,3	6,29	2,83
V5578	ZDO	PRT	105,6	105,0	-12,5	-0,1	12,4	1,0	-0,067	68,6	15,24	-131,63
V556	PRT	VY	105,6	105,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000	0,0	0,00	0,00

V tab. 8.7 jsou uvedeny poměry na vedení při výpadku daných vedení a změny zatížení vedení oproti bezporuchovému provozu s můstkovým zapojením.

Tab. 8.8: Balance ztrát činného výkonu v případě výpadku vedení V5501, V5502 a V5506

Ztráty činného výkonu	ΔP	$\delta \Delta P$
	[MW]	[%]
na transformátorech 110/vn	-2,467	0,00
na transformátorech 400/121 kV	-0,123	0,00
na vedení	-5,458	2,75
Celková bilance	-8,048	1,86

8.3 Vyhodnocení ustáleného chodu sítě při mimořádných stavech

Výpadek přípojnice „C“ v Otrokovicích (OKC-C)

Při tomto mimořádném stavu dojde vlivem vypnutí vedení na straně Otrokovic (OKC-C) k rozpojení jednotlivých okruhů, z nichž pak vznikají rozvody paprskové. Dále dochází k poklesu napětí v jednotlivých uzlech napájených z můstku, avšak nikde napětí nepřesáhne povolenou hranici. Největší pokles napětí oproti normálnímu stavu byl zaznamenán v rozvodně Zdounky (ZDO). Napětí v tomto uzlu pokleso vlivem výpadku na 105,0 kV, což znamená pokles o 11,62 % proti původní hodnotě napětí.

Transformátor T403 přebírá zatížení od vyplého transformátoru T401 a je zatížen na 69,73 % svého maximálního možného zatížení. Transformátor T402 zůstává zatížen stejně jako ve všech předchozích případech z důvodu, jenž je znám z úvodu této kapitoly.

Vlivem přerušení okružních rozvodů, resp. okruhů a vznikem rozvodů paprskových se změní směry toků výkonů na vedení a také dochází ke značnému navýšení zatížení vedení v některých případech. Podrobnější přehled poskytuje tab. 8.3. Nejvyšší zatížení je pak vypočteno u vedení V5575 a V5577. Hodnota zatížení dosahuje u prvního vedení 95,49 %, u druhého potom 93,78 %. Tyto hodnoty zatížení se blíží maximální dovolené proudové zatížitelnosti vedení a je třeba na to brát zřetel.

Všechny kontrolované hodnoty jsou v přijatelných mezích. Z poměrů na vedení při tomto vyjimečném stavu vyplývá, že je nutné dát si pozor na to, aby vedení V5575 a V5577 nebyly dlouhodobě přetěžovány. Je tedy potřeba v co nejkratší době buďto obnovit provoz přípojnice „C“ (OKC-C) nebo přepojit vedení V5576 na přípojnicí „B“ (OKC-B) a obnovit tak daný okruh. Podobně je to v případě napájení rozvodny Hulín (HUN). Je nežádoucí, aby byla daná lokalita delší dobu napájena ze strany ČEZ a už vůbec není žádoucí, aby byla bez napětí. Proto je potřeba

vedení V550 rovněž přepojit na přípojnicí „B“ (OKC-B) a obnovit tak dodávku elektřiny ze strany E.ON do Hulína (HUN).

Výpadek vedení V5501, V5502 a V5506

Napěťové poměry v případě tohoto vyjímečného stavu se mění minimálně a všechny jsou v povolených mezích. Největší pokles napětí byl zaznamenán v rozvodně Otrokovice Bahňák (BHN), kde napětí pokleslo o 0,34 % oproti původní hodnotě při normálním stavu a můstkovém zapojení. Zbylé hodnoty jsou vypsány v tab. 8.5.

Transformátory 400/121 kV jsou všechny v provozu a jejich zatížení se vlivem výpadku vedení nepatrně změnilo pouze u transformátorů T401 a T403. Největší změna pak byla zaznamenána u transformátoru T401, kde se zatížení zvýšilo o 0,22 %, oproti původní hodnotě.

Výpadkem výše uvedených vedení došlo k přerušení okruhu č. 3 a č. 5. V okruhu č. 3 je propojení rozvoden Otrokovice a Mladcová přímo pouze jedním vedením V5503 a nepřímo přes rozvodu Malenovice ZPS (MLE) vedeníma V5504 a V5509. Okružní způsob napájení v okruhu č. 3 tak není přerušen, ale je značně oslaben. V celé oblasti se zatížení vedení oproti normálnímu stavu při můstkovém zapojení, prakticky nemění, výjma vedení v postižených okruzích. Výraznější změna zatížení je tedy zaznamenána na vedeních V5503, V5504, V5505, V5507, V5508 a V5509, avšak u žádného z nich nedošlo k překročení povoleného zatížení. Tyto vedení jsou pak, pro přehlednost v tab. 8.6 patřičně označeny.

9 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Z výše uvedených vypočtených hodnot vyplývá, že při zapojení oblasti bez můstku i s můstkem jsou všechny sledované veličiny ustáleného chodu sítě v předepsaných mezích. Velikost napětí v uzlech sítě, v okruzích č. 1 až č. 6, se při zapojení s můstkem zvýší maximálně o 0,6 % oproti hodnotě při zapojení bez můstku. Zároveň dochází ke zmenšení hodnoty fáze napětí. Největší změna fáze, o 100,52 % oproti hodnotě při zapojení bez můstku, byla zaznamenána na přípojnici „B“ v otrokovické rozvodně (OKC-B). Zatížení vedení se v případě můstkového zapojení snižuje, v maximálním případě o 0,73 % oproti hodnotě zatížení v případě zapojení sítě bez můstku. Rovněž při můstkovém zapojení dochází k razantnímu poklesu zatížení u transformátoru T401 v otrokovické rozvodně. Po připojení transformátoru T403 se tok výkonů rozdělí mezi tyto dva transformátory, čímž dojde k avizovanému snížení zatížení transformátoru T401. Ztráty činného výkonu v oblasti Otrokovice vlivem můstkového zapojení klesly o 0,083 MW. Za zmínku také stojí neměnnost poměrů v okruhu č. 7 v závislosti na změně zapojení. Tento okruh je napájen nezávisle přes transformátor T402 z přípojnice „A“, v Otrokovicích (OKC-A) a zmíněná změna zapojení nemá tedy vliv na sledované veličiny v tomto okruhu, což potvrzují i samotné vypočtené hodnoty. Ve výše uvedených tabulkách jsou vedení a rozvodny v tomto okruhu pro lepší orientaci odděleny dvojitou čarou od rozvoden a vedení v ostatních okruzích.

Co se zkratových poměrů týče, při můstkovém zapojení dochází k jejich zhoršení, resp. dochází k navýšení zkratových příspěvků v jednotlivých rozvodnách, avšak nikde tyto hodnoty nepřesahují zkratovou odolnost, pouze se k ní nebezpečně přibližují. Nejvíce je počátečním rázovým zkratovým výkonem zatížena rozvodna Malenovice ZPS (MLE). Zatížení tam dosahuje v případě trojfázového zkratu hodnoty 99,41 % a v případě zkratu jednofázového hodnoty 90,73 % jmenovité zkratové odolnosti dané rozvodny.

Jak již bylo řečeno výše, je potřeba počítat i s různými mimořádnými událostmi a stavy, které se mohou v síti vyskytnout. Z tohoto důvodu byl proveden výpočet ustáleného chodu sítě v můstkovém zapojení pro případ, že dojde k výpadku přípojnice „C“ v rozvodně Otrokovice (OKC-C) a k vypnutí vedení V5501, V5502 a V5506. Ani v jednom případě nedošlo k překročení předepsaných mezí sledovaných veličin.

V prvním případě došlo k poklesu napětí v uzlech sítě a ke zvýšení hodnoty jeho fáze. Nejmenší pokles napětí byl zaznamenán v rozvodně Zdounky (ZDO), kde napětí pokleslo na hodnotu 105,1 kV s fází -15,9°. Zatížení transformátorů 400/121 kV se zvětšilo v případě transformátoru T403 o 39,7 % oproti hodnotě zatížení v bezporuchovém stavu sítě. U dvou vedení se hodnota zatížení přiblížila maximální dovolené hodnotě. Jedná se o vedení V5575 a V5577. První vedení je v tomto případě zatíženo z 95,43 %, druhé pak z 93,78 %, přičemž tato vedení mají přenosovou schopnost 95 MW a 80 MW a maximální možné proudové zatížení je 450 A.

V případě druhém došlo vlivem vypnutí daných vedení k nepatrnému zmenšení napětí v uzlech sítě. Největší pokles napětí, o 0,34 %, oproti běžnému bezporuchovému stavu, je zaznamenán v rozvodně Otrokovice Bahňák (BHN). Zatížení transformátorů 400/121 kV se takřka nezměnilo. Maximální změna byla zaznamenána 0,22 % u transformátoru T401. Zatížení vedení v žádném případě nepřekročilo maximální povolenou hodnotu ani se k ní nepřiblížilo. K výrazným změnám zatížení došlo pouze u vedení V5503, V5504, V5505, V5507, V5508, V5509. V případě vedení V5507 byla pak změna největší a to o 96,23 % oproti běžnému chodu sítě.

Při vyhodnocování vypočtených hodnot je zapotřebí přijmout fakt, že během výpočtů byly způsobeny chyby při zaokrouhlování, a také musíme počítat s chybami měřících přístrojů v síti,

kterými se měří základní veličiny. Naměřená data se pak odesílají na dispečink a jsou zpracovávány programem Sinaut, který s těmito hodnotami, zatíženými určitou chybou měření, dále počítá. Rozdíl hodnot v řádech desetin tedy nemusí nutně znamenat, že výpočet neproběhl správně.

10 NÁVRH MOŽNÝCH OPATŘENÍ

Po posouzení topologie sítě, v oblasti Otrokovice a vypočtených hodnot byly navrženy níže uvedené opatření. Při navrhování opatření bylo bráno v úvahu možné budoucí rozšíření distribuční sítě, především z hlediska nárůstu počtu odběrných míst a tím zvýšení odebíraného výkonu, a pak také z hlediska připojení možných nových zdrojů pracujících, ať už, do sítě 22 kV nebo přímo do sítě 110 kV. Navržená opatření jsou uvedena v následujících bodech.

- posílení vedení V5594 o další vedení. V případě výpadku stávajícího vedení je oblast rozvodny Konice napájena pouze částečně ze sítě 22 kV, což je nedostatečné.
- posílení vedení V5510 o další vedení. Stejný případ jako v předchozím bodě.
- zvýšení zkratové odolnosti nebo omezení zkratových výkonů v rozvodnách Malenovice ZPS (MLE), Otrokovice Bahňák (BHN) a Otrokovice Barum (BAR). Po případném připojení nového zdroje do stávající sítě a současném provozu oblasti v můstkovém zapojení by zkratové poměry v těchto rozvodnách přesáhly povolenou mez, což je nepřijatelné.

11 ZÁVĚR

Práce se, dle zadání, zabývá posouzením různých zapojení sítě 110 kV v oblasti rozvodny 110 kV Otrokovice z hlediska vlivu na ustálený chod sítě a zkratové poměry. Pod pojmem „různá zapojení“ rozumíme dvě varianty zapojení sítě v dané oblasti. První z nich je zapojení bez můstku, druhá pak zapojení s můstkem.

Teoretická část práce je rozdělena na dvě kapitoly. První z nich se zaměřuje na výpočet ustáleného chodu v sítích velmi vysokého napětí, druhá je pak věnována přechodným jevům, přičemž nejvíce pozornosti je zde věnováno zkratům a jejich výpočtům.

Teorie výpočtu ustáleného chodu sítí vvn obsahuje popis klasifikace uzlů a podmínek určitosti chodu sítě, dále je zde odvozen výpočet ustáleného chodu jako lineární a nelineární úloha a jsou zde popsány dvě iterační metody, Gauss-Seidlova a Newtonova metoda, pomocí kterých se výpočet ustáleného chodu sítě provádí.

Teoretická část věnovaná přechodným jevům popisuje ve svém úvodu význam a rozdělení přechodných jevů, vyskytujících se v elektrizačních soustavách. Podrobněji jsou pak popsány zkratové poruchy, jejich popis, průběh, charakteristické hodnoty, výpočty a účinky.

Praktická část obsahuje popis sítě 110 kV v oblasti Otrokovice a vyhodnocení výpočtů ustáleného chodu a zkratových poměrů v této oblasti pro zapojení bez můstku a s můstkem. Dále je pak provedeno zhodnocení výpočtu ustáleného chodu sítě při miřádných stavech, jenž mohou nastat. V našem případě se jedná o výpadek jednoho z přípojniových systémů v rozvodně Otrokovice a současněmu výpadku několika vedení. Na základě těchto výpočtů a jejich vyhodnocení jsou navrženy možná opatření vedoucí ke zlepšení poměrů v síti.

11.1 Vyhodnocení praktické části práce

Distribuční síť 110 kV E.ON v oblasti Otrokovice je provozována podle potřeby v zapojení bez můstku a zapojení s můstkem. Zapojení s můstkem je potom nejvíce využíváno v zimních obdobích, kdy se hodnoty odebíraných výkonů blíží k ročnímu maximu a zatížení sítě je tak největší z celého roku. Obě tyto zapojení mají, jako všechno, své výhody i nevýhody. Cílem praktické části a celé práce pak bylo zhodnocení obou těchto zapojení z hlediska ustáleného chodu sítě a zkratových poměrů.

Při zapojení bez můstku je každá, ze dvou částí oblasti Otrokovice nezávisle na sobě napájena přes jeden transformátor 400/121 kV z jednoho přípojniového systému. V případě můstkového zapojení jsou dva přípojniové systémy v rozvodně Otrokovice spojeny příčným spínačem přípojniových v jeden, a do každého přípojniového systému pracuje jeden ze dvou transformátorů 400/121 kV. Ze třetího systému přípojniových je pak napájena jedna část oblasti a z můstku pak druhá. Podrobně je můstkové zapojení popsáno v kapitole 7.

První výhodou můstkového zapojení oproti zapojení základnímu je ve vyšší spolehlivosti dodávky elektrické energie. V případě základního zapojení a výpadku jednoho z přípojniových systémů dojde k odpojení rozvoden připojených na tento systém a k přerušení dodávky elektrické energie. V případě můstkového zapojení a této poruchy je část oblasti i na dále napájena bez jakéhokoli výpadku či omezení dodávky. Pouze dojde k přerušení daných okruhů a změnám napěťových poměrů, zatížení vedení a transformátorů v části oblasti napájené z můstku. Simulace tohoto vyjimečného stavu a jeho vyhodnocení je provedeno kapitole 8.

Další z výhod můstkového zapojení spočívá ve zlepšení napětových poměrů v uzlech napájených z můstku. Zároveň dochází ke snížení zatížení vedení a transformátorů 400/121 kV. Ztráty činného výkonu v síti se také zmenšují.

Velkou nevýhodou můstkového zapojení je navýšení zkratových výkonů v síti. Důvodem je společný provoz dvou transformátorů 400/121 kV do jednoho uzlu sítě. Uzlem v tomto případě rozumíme spojení dvou přípojniových systémů v jeden, jak je popsáno výše.

Účelem simulace výpadku vedení V5501, V5502 a V5506 bylo ověřit zda při zachování můstkového zapojení a výpadku těchto vedení, s ohledem na napětové poměry v uzlech a zatížení vedení a transformátorů, bude síť možno dále bez problémů provozovat. Při výpadku vybraných vedení v případě můstkového zapojení a dané velikosti odebíraného výkonu, nedochází k přetěžování vedení ani transformátorů. Napětí v uzlech a ztráty činného výkonu se také mění nepatrně. Síť je tedy možno při daném zatížení a zapojení provozovat po dobu nutnou k odstranění příčiny výpadku.

Na základě vypočtených hodnot a jejich porovnání bylo navrženo několik opatření. Jedná se o výstavbu nových vedení pro posílení stávajících vedení V5594 a V5510 a zvýšení zkratové odolnosti nebo omezení zkratových výkonů v rozvodnách Otrokovice Barum, Otrokovice Bahňák a Malenovice ZPS. Důvody vedoucí k těmto opatřením jsou uvedeny v kapitole 10.

Podle dosažených výsledků uvedených výše lze říci, že použití můstkového zapojení sítě, v oblasti Otrokovice, je i přes navýšení zkratových výkonů, výhodné.

12 POUŽITÁ LITERATURA A JINÉ ZDROJE INFORMACÍ

Knihy a jiné písemné zdroje

- [1] REISS, L.; MALÝ, K.; PAVLÍČEK, Z. *Teoretická elektroenergetika II*. Bratislava : ALFA, 1971. 440 s.
- [2] PAUZA, J. *Zkratky v elektrických obvodech*. Praha 1 : SNTL, 1970. 248 s.
- [3] KUČERA, D. *Elektroenergetika I*. Brno : VUT v Brně, 1986. 214 s.
- [4] HALUZÍK, E. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. Brno : VUT v Brně, 1983. 126 s.
- [5] BLAŽEK, V.; SKALA, P. *Distribuce elektrické energie*. Brno : VUT v Brně, 138 s.
- [6] BLAŽEK, V.; PAAR, M. *Přenosové sítě*. Brno : VUT v Brně, 2007. 122 s.
- [7] SEDLÁČEK, J.; VALSA, J. *Elektrotechnika II*. Brno : VUT v Brně, 2004.
- [8] ČSN EN 60909-0 (333022). *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*. [s.l.] : [s.n.], 2002. 64 s.

www stránky

- [9] E.ON : Distribuce elektřiny [online]. 2008 [cit. 2011-05-11]. E.ON - Distribuce. Dostupné z WWW:
<<http://www.eon-distribuce.cz/cs/distribuce-elektriny/distribucni-soustava/index.shtml>>.

PŘÍLOHY

1. Protokoly s vypočtenými hodnotami vygenerovanými programem Sinaut Spectrum.